

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA VÝROBNÍCH STROJŮ A KONSTRUOVÁNÍ



OVERENIE TECHNICKÝCH PARAMETROV
ENERGETICKY ÚČINNÝCH LOŽISIEK

VERIFICATION OF THE TECHNICAL PARAMETERS OF
ENERGY-EFFICIENT BEARINGS

Študent:

Bc. Juraj Mareček

Vedúci diplomovej práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

OSTRAVA 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Juraj Mareček**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Ověření technických parametrů energeticky účinných ložisek**
Verification of the Technical Parameters of Energy-Efficient Bearings

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce se zabývejte problematikou energeticky účinných ložisek. Zaměřte se na specifikata těchto ložisek, např. konstrukce, mazání, životnost, teplota, třídy přesnosti apod. V rámci práce se dále zabývejte energetickými specifiky těchto ložisek ve srovnání s běžně používanými ložisky.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Další bližší informace provede vedoucí práce a firma Siemens Elektromotory s.r.o., závod Frenštát p.R

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01-02417-2

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta:

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave 21.5. 2012

.....

Bc. Juraj Mareček

Prehlasujem, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostrave 21.5. 2012

.....

Bc. Juraj Mareček

Adresa studenta:

Raková 309, Raková, 023 51

ANOTÁCIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

Mareček J.: Overenie technických parametrov energeticky účinných ložísk, Ostrava:
Fakulta Strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, VŠB – TU Ostrava,
2012, 67 s., diplomová práce, vedúci: Ing. Jan Blata, Ph.D.

Diplomová práca sa zaoberá overením technických parametrov energeticky účinných ložísk. Tieto parametre sme v spolupráci s firmou Siemens s.r.o. overovali na typovej skúške elektromotora. V úvode práce sa venujem teoretickému popisu ložísk a elektromotora. V nasledujúcej časti predostriem charakteristiku a popis ložísk, ktoré sa aktuálne montujú do motorov. Ďalej práca poskytuje technické riešenie, ktorým sú energeticky účinné ložiská. Popisuje a charakterizuje ich vlastnosti. Práca obsahuje porovnanie oboch ložísk, ktoré sú uvádzané výrobcom. Praktické overenie prebehlo na typovej skúške vo výrobnom závode Elektromotory Frenštát. V typovej skúške sme vykonali merania vibrácií, hlučnosti, oteplenia a charakteristiky na prázdno. V závere práce zhrňujem nadobudnuté poznatky z vykonaných meraní a zhodnocujem energetickú účinnosť ložísk.

ANNOTATION OF THESIS

Mareček J.: Verification of the technical parameters of energy-efficient bearings, Ostrava:
Faculty of Mechanical Engineering, Department of production machines and
design, VŠB – TU Ostrava, 2012, 67 p., Thesis, head: Ing. Jan Blata, Ph.D.

The thesis deals with the verification of the technical parameters of energy-efficient bearings. These parameters were verified in cooperation with Siemens s.r.o. in electromotor type test. The introduction of the work is dedicated to the theoretical description of the bearings and electromotor. The following section presents characterization and description of bearings, which are currently installed in electromotor. In further part, the work provides technical solution, that is the energy-efficient bearings. It describes and characterizes their properties. The work includes a comparison of both bearings, which are declared by the manufacturer. Practical verification was carried out at electromotor type test in the factory Electromotors Frenštát. In type test, we performed measurements of vibration, noise, temperature rise and characteristics at no load. In conclusion work summarizes the acquired knowledge from the measurements and evaluates the energy efficiency of the bearings.

Obsah:

Zoznam použitých skratiek a značenia:	9
Úvod	11
1 Ložiská	12
1.1 Rozdelenie a charakteristika ložísk	12
1.2 Konštrukčné zásady uloženia s valivými ložiskami	16
1.3 Výpočet ložísk	20
2 Trojfázový asynchrónny motor	22
2.1 Princíp činnosti asynchrónneho motora	22
2.2 Ložiskové uzly elektromotora	25
3 Aktuálny stav	26
3.1 Charakteristika a konštrukcia ložiska SKF Explorer 6312-2Z/C3	26
3.2 Základné údaje	27
4 Navrhované technické riešenie	30
4.1 Charakteristika a konštrukcia ložiska SKF E2.6312-2Z/C3	30
4.2 Základné údaje	31
5 Porovnanie vlastností ložísk SKF Explorer a SKF E2	33
5.1 Mechanické straty	33
5.2 Životnosť plastického maziva	34
5.3 Prevádzková teplota	34
6 Typová skúška motora	36
7 Meranie vibrácií motora	38
7.1 Vibrácie	38
7.2 Vyjadrenie amplitúdy signálu	38
7.3 Základné metódy vibrodiagnostiky	39
7.4 Základné sledované veličiny kmitania	40

7.5	Snímače vibrácií.....	41
7.6	Meranie celkových vibrácií.....	44
7.7	Voľba meracích miest.....	44
7.8	Meracia technika.....	45
7.9	Výsledky merania	46
8	Otepľovacia skúška motora	48
8.1	Termoelektrické snímače teploty.....	48
8.2	Popis a vyhodnotenie merania.....	50
9	Meranie hlučnosti motora	53
9.1	Popis merania hlučnosti	53
9.2	Meracia technika.....	53
9.3	Vyhodnotenie merania.....	54
10	Meranie na prázdno	55
10.1	Charakteristika naprázdno	55
10.2	Zásady merania	55
10.3	Postup merania	56
10.4	Vyhodnotenie merania.....	57
10.5	Vyhodnotenie merania na prázdno so štandardnými ložiskami.....	58
10.6	Vyhodnotenie merania na prázdno s energeticky účinnými ložiskami.....	60
10.7	Vyhodnotenie mechanických strát.....	62
	Záver.....	63
	Pod'akovanie:	64
	Použitá literatúra:	65
	Prílohy:.....	67

Zoznam použitých skratiek a značenia:

NU	Typ ložiska
NUP	Typ ložiska
NJ	Typ ložiska
1LE1	Typ elektromotora
SKF Explorer	Názov ložiska
SKF E2	Názov ložiska
2Z	Krycie plechy ložiska
C3	Radiálna vnútorná vôľa ložiska
RMS	Efektívna hodnota
FTT	Fourierová transformácia
F_a	Axiálne zaťaženie ložiska
F_r	Radiálne zaťaženie ložiska
F_{rm}	Minimálne zaťaženie ložiska
F_e	Dynamické ekvivalentné zaťaženie
P_u	Medzné únavové zaťaženie
L_h	Základná hodinová trvanlivosť
d	Malý priemer ložiska
d_m	Stredný priemer ložiska
D	Veľký priemer ložiska
B	Šírka ložiska
C	Ložisková únosnosť
X, Y	Súčinitele podľa pomeru F_r / F_a
p	Koeficient druhu ložiska
f_d, f_k, f_p	Súčinitele prídavných síl
k_r	Súčiniteľ minimálneho zaťaženia ložiska
T	Prevádzková teplota
j6, k6, J7, K7, H7, H8, P5	Rozmerové tolerancie
τ_k	Napätie v krute
M_k	Krútiaci moment
W_k	Modul prierezu v krute
R_a	Stredná aritmetická drsnosť
n	Otáčky
a_{eff}	Efektívna hodnota zrýchlenia vibrácií
v_{eff}	Efektívna hodnota rýchlosti vibrácií
s_{eff}	Efektívna hodnota odchýlky vibrácií

v	Viskozita oleja
mm	Milimeter
s	Sekunda
K	Kelvin
V	Volt
A	Ampér
min	Minúta
N	Newton
min ⁻¹	Otáčky za minútu
m	Meter
dB	Decibell
μm	Mikrometer
°C	Stupeň celzia
%	Percento
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
W	Watt
MW	Megawatt
kW	Kilowatt

Úvod

Cieľom mojej diplomovej práce je overenie technických parametrov energeticky účinných guľôčkových ložísk v porovnaní so štandardnými guľôčkovými ložiskami pri aplikácii v asynchrónnych elektromotoroch.

V dnešnej dobe kladú technické normy výrobcov elektromotorov stále vyššie nároky na účinnosť. Každým dňom je stále dôležitejšie a aj nutné šetriť energiou a preto akékoľvek technické riešenie, ktoré prispeje k zníženiu energie je považované za prínos pre strojárstvo. V mojej diplomovej práci som overoval technické parametre ložísk, ktoré priamo súvisia s účinnosťou elektromotorov.

„Kto neide dopredu, ide dozadu, neexistuje nehybný stav.“ [16]

Úvodom práce sa venujem priblíženiu problematiky ložísk, kde popisujem princíp a účel ložísk ako aj ich rozdelenie a charakteristiku. Vypracoval som základné konštrukčné zásady pri návrhu ložísk do pracovného stroja ako aj ich základný výpočet. V ďalšej časti práce popisujem asynchrónne elektromotory. Trojfázový asynchrónny motor je výrobne jednoduchý a preto najlacnejší elektrický motor s veľkou mierou spoľahlivosti. Je najčastejšie používaným motorom pre najrôznejšie aplikácie.

V práci sa venujem predstaveniu a charakteristike porovnávaných ložísk a vzájomným zhodnotením ich vlastností pri použití v elektromotore. Pre praktické porovnanie sme v spolupráci s firmou Siemens s.r.o. vykonali typové skúšky elektromotora, pri ktorých sme v motore použili oba typy ložísk. Vyhodnotením týchto skúšok sa venujem v druhej polovici mojej diplomovej práce. Výrobca ložísk uvádza, že energeticky účinné ložiská vykazujú o 30 % menšie mechanické straty ako u štandardných ložísk. Táto hypotéza sa potvrdila pri vykonaní merania na prázdno, ktorým sme určili mechanické straty motora. Mechanické straty sú závislé na použitých ložiskách. Ďalej sme vykonali vibrodiagnostické meranie, porovnávali sme celkovú hlučnosť motora, vyhodnocovali oteplenie ložísk pri prevádzke. Nízkoenergetické ložiská vykazovali približne o 5 % nižšie celkové oteplenie, čo taktiež potvrdzuje domnienku o úspore energie. Rozdiel teplôt sme potvrdili snímkami z termovízie.

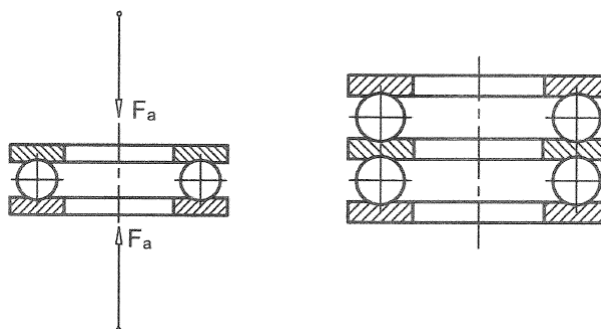
1 Ložiská

Ložiská sú strojárenské súčiastky, ktoré slúžia na prenos rotačného pohybu alebo krútiaceho momentu medzi pohyblivými a pevnými časťami mechanického stroja, pričom sú vyrobené tak, aby sa minimalizovalo trenie vznikajúce medzi pohyblivými a pevnými časťami stroja. Ložiská v stroji niektoré sily zachytávajú, iným umožňujú voľný pohyb, záleží od jeho typu.

1.1 Rozdelenie a charakteristika ložísk

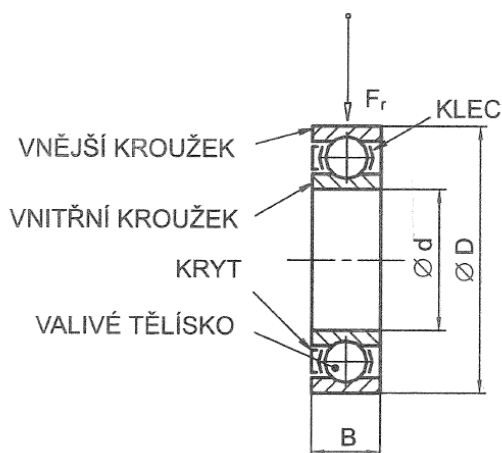
Podľa zachytávanej sily:

- Axiálne (väčšina zachytených síl pôsobí v smere osi rotácie)



Obrázok č. 1 – Axiálne jednoradé a dvojradé ložisko [4]

- Radiálne (väčšina zachytených síl pôsobí kolmo na os rotácie)



Obrázok č. 2 – Radiálne jednoradé guľôčkové ložisko [4]

Podľa konštrukcie:

Klzné:

Pozostávajú z puzdra a hriadeľa, ktorý ním prechádza. Puzdro je obyčajne vyrobené zo samomazného bronzu alebo mosadze, prípadne kompozitov alebo plastu. Klzné ložiská sa obvykle používajú tam, kde sú neustále mazané, napríklad v spaľovacích motoroch, čo umožňuje vyššiu trvanlivosť ako pri ložiskách valivých. Umožňujú tiež prenos väčších síl.

Charakteristika klzných ložísk:

Ložiská umožňujú otočné uloženie čapov a hriadeľov, zachytávajú v nich pôsobiace radiálne a axiálne sily a prenášajú tieto sily na ostatné časti mechanizmu alebo stroja. Medzi ložiskom a hriadeľom vzniká klzné trenie, ktoré spôsobuje opotrebenie súčasti a stratu energie. Na veľkosť trenia má vplyv tlak v ložisku, materiál ložiska, materiál hriadeľa, kvalita povrchov, obvodová rýchlosť hriadeľa a prevádzková teplota. Veľkosť trenia ide ovplyvniť vhodnou konštrukciou uloženia a mazaním klzných plôch.

Výhody klzných ložísk oproti valivým:

- Jednoduchá montáž aj demontáž (hlavne u delených ložísk)
- Menší vonkajší priemer
- Pokojný a tichý chod
- Väčšia únosnosť
- Znesú rázovité zaťaženia
- Niektoré materiály umožňujú prácu ložiska bez mazania pri vyšších teplotách, prípadne vo vlhkom či chemicky agresívnom prostredí

Nevýhody klzných ložísk oproti valivým:

- Nutná presná výroba (dodržanie tolerancií)
- Väčšia dĺžka ložiska
- Väčšie nároky na údržbu, pretože je nutné zaistiť u väčšiny typov kvalitné mazanie a čistotu prostredia
- Väčšia spotreba maziva, možnosť zadretia pri nekvalitnom mazaní

- Sú menej vhodné pre prerušovaný chod, pretože pri rozbehu a dobehu môžu ložiská pracovať v oblasti suchého trenia

Valivé:

Obsahujú valivé telieska rôznych tvarov. Používajú sa hlavne tam, kde je potrebný malý odpor a nie je možné neustále mazanie. Neumožňujú vysoké rýchlosti a veľké prenášané sily.

Charakteristika valivých ložísk:

Valivé ložiská majú väčšie uplatnenie ako klzné. Šmykové trenie je u nich nahradené valivým trením valivých teliesok, ktoré majú tvar gule, valca, kužela, ihly, alebo súdku. Vzniká tu aj šmykové trenie a to medzi telieskami a kľetkou. Kľetka udržiava telieska v požadovanej polohe na dráhach krúžkov.

Výhody valivých ložísk oproti klzným:

- Menšie trenie a tým aj väčšia účinnosť a to pri rozbehu, dobehu, pri malých otáčkach a pri kývavom pohybe
- Menšia dĺžka ložiska
- Väčšina typov radiálnych ložísk zachycuje aj axiálne sily
- Sú odolnejšie proti zadreniu
- Menšie nároky na údržbu (potrebujú menej maziva)
- Všetky sú normalizované, bežne dostupné pre výmenu
- Umožňujú vysoké otáčky hriadeľov bez značného nárastu oteplenia

Nevýhody valivých ložísk oproti klzným:

- Horšie znášajú rázy
- Majú väčší vonkajší priemer oproti klzným
- Pri vyšších otáčkach môžu byť hlučnejšie

Nie je možné jednoznačne všeobecne vymedziť použiteľnosť klzných alebo valivých ložísk. Okrem technických hľadísk je nutné brať do úvahy aj hľadiská ekonomické. Hromadná výroba všetkých valivých a niektorých klzných ložísk umožňuje relatívne nízke výrobné náklady. Výber druhu ložiska je nutné posúdiť komplexne. Keďže táto diplomová práca je zameraná na valivé ložiská nebudem sa v ďalšom texte zaoberať ložiskami klznými a pod pojmom ložisko bude myslené ložisko valivé.

Rozdelenie valivých ložísk:

Podľa valivého telieska rozdeľujeme radiálne ložiská na:

- Guľôčkové
- Valčekové
- Súdočkové
- Kuželíkové
- Ihlové



Obrázok č. 3 – Valivé telieska ložísk [4]

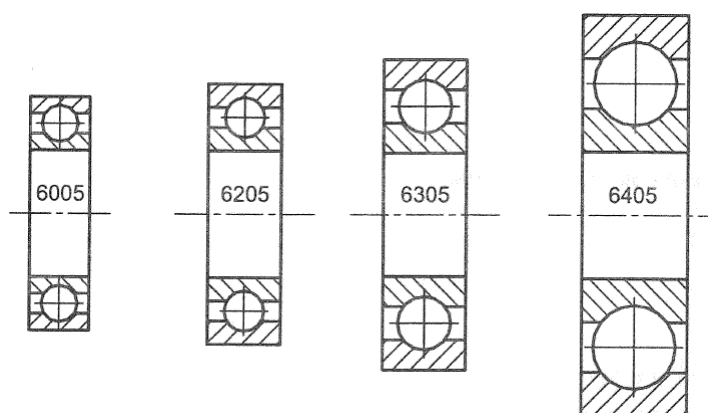
Axiálne ložiská rozdeľujeme na:

- Guľôčkové
- Súdočkové

Podľa počtu radov teliesok rozdeľujeme ložiská na:

- Jednoradové
- Dvojradowé

Základným parametrom z hľadiska únosnosti sú u ložísk dynamická a statická únosnosť, ktoré súvisia s rozmermi D a B . Tieto rozmery sú potom ako typová rada súčasťou označenia ložiska. Na obr. č.4 sú guľôčkové ložiská typu 60, 62, 63, 64. Všetky majú rovnaký vnútorný priemer d , ale rôznu únosnosť.



Obrázok č. 4 – Typy ložísk podľa únosnosti [4]

1.2 Konštrukčné zásady uloženia s valivými ložiskami

Voľba druhu ložiska:

Hlavnými kritériami pri voľbe určitého druhu ložiska sú:

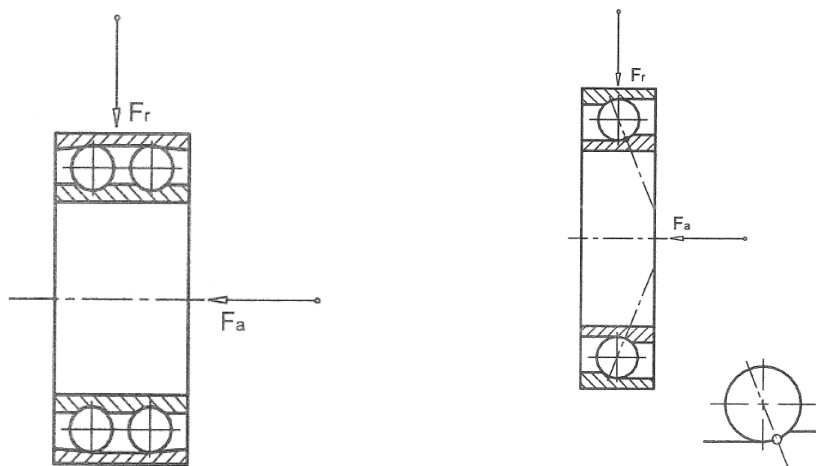
- Veľkosť radiálneho a axiálneho zaťaženia
- Smer pôsobenia axiálneho zaťaženia
- Smer pôsobenia axiálnej sily
- Potreba tuhosti hriadeľa alebo naopak umožnenie jeho priehybu
- Požiadavka jednoduchšej demontáže
- Presnosť uloženia hriadeľov

Jednoradové guľôčkové ložiská:

Tieto ložiská patria k najčastejšie používaným. Znášajú radiálne aj axiálne zaťaženie. Ak prevažuje axiálna sila v jednom smere, je lepšie ju zachytiť jednoradovým axiálnym guľôčkovým ložiskom, pre oba smery sa potom použije dvojradové axiálne ložisko. Najväčšiu axiálnu silu v jednom smere, vrátane radiálnej, zachycuje súdočkové axiálne ložisko. Má použitie hlavne vo veľkých strojoch so zvislými hriadeľmi.

Jednoradové guľôčkové ložiská s kosouhlým stykom:

Zachytávajú aj značné axiálne sily v jednom smere. Umožňujú navyše aj vymedzenie vôle, čím zaručia presné uloženie napríklad vreteno brúsok či iných presných obrábacích strojoch. Dvojradové guľôčkové ložiská s kosouhlým stykom zachytávajú axiálne sily v oboch smeroch.



Obrázok č. 5 – Dvojradé naklápacie ložisko a ložisko s kosouhlým stykom [4]

Dvojradowé guľôčkové naklápacie ložiská:

Naklopením vnútorného krúžku umožňujú priehyb hriadeľa, ktorá vznikne napríklad u dlhých, málo tuhých hriadeľov alebo montážnu nesúosovosť dier pre ložiská.

Valčkové ložiská:

Majú až o 60 % vyššiu radiálnu únosnosť v porovnaní s rovnako veľkými guľôčkovými ložiskami, lepšie znášajú rázy a dynamické zaťaženie. Výhodou je rozobrateľnosť (okrem typu *NUP*), kedy sú podľa typu ložiska valčeky uchytené buď vo vonkajšom krúžku (typ *NU* a *NJ*) alebo vo vnútornom krúžku (typ *N*). Toto konštrukčné riešenie umožňuje malé axiálne posuny krúžkov oproti sebe a tým aj napríklad tepelnú rozťažnosť hriadeľa. Typ *NJ* prenáša aj malé axiálne sily v jednom smere, *NUP* v oboch smeroch.

Ihlové ložiská:

Majú valčeky s malým priemerom a väčšiu dĺžku. Sú tuhé, znášajú dynamickejšie a rázovité zaťaženie. Hodia sa pre nižšie otáčky. Majú malé rozmery v radiálnom smere, ktoré sa dajú ešte zmenšiť vypustením jedného či oboch krúžkov.

Dvojradowé súdočkové ložiská:

Majú podobné uplatnenie ako dvojradowé guľôčkové, ale pre väčšie zaťaženie a skôr menšie otáčky.

Kuželíkové ložiská:

Zo všetkých radiálnych ložísk môžu prenášať najväčšie axiálne zaťaženie. Dobre znášajú aj rázy a dynamické zaťaženie. Sú rozoberateľné. Týchto vlastností sa využíva pre uloženie napríklad kolies automobilu a hriadeľov v prevodovkách.

Správna voľba ložiska so správnymi kritériami je dôležitá pre celkovú životnosť stroja. Príklady vhodných uložení overených praxou, vrátane výberu optimálneho druhu ložiska, sú uvádzané v katalógoch výrobcov ložísk.

Tolerancie:

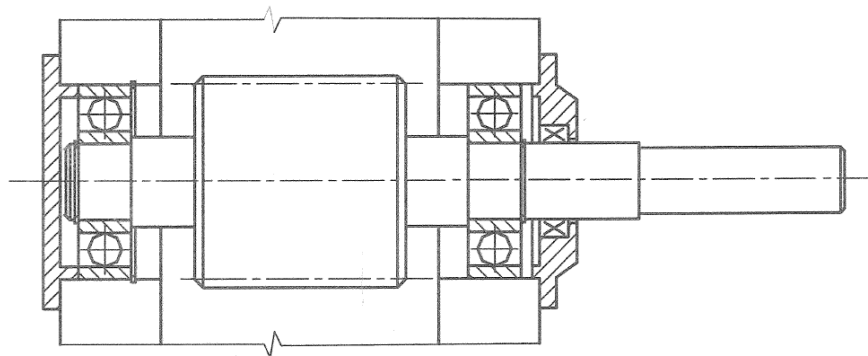
Správna voľba tolerancii má význam pre životnosť ložiska. Nesprávnou voľbou môže nastať zmenšenie radiálnej vôle a tým k zníženiu životnosti ložiska.

Pre hriadeľ sa volí prechodné uloženie *j6*, *k6*. Otvory pre uloženie vonkajšieho krúžku sú tolerované v sústave jednotného hriadeľa. Pokiaľ má byť vonkajší krúžok nehybný, použijú sa tolerancie *J7*, *K7*. Pre posuvný vonkajší krúžok z dôvodu tepelnej rozťažnosti hriadeľa sú vhodné tolerancie *H7*, *H8*. Vzájomný posuv krúžkov ložiska v dôsledku

rozťažnosti (zmrštenia) hriadeľa je možné tiež riešiť použitím valčekových alebo ihlových ložísk, ktoré tento pohyb umožňujú.

Axiálne poistenie krúžkov ložiska:

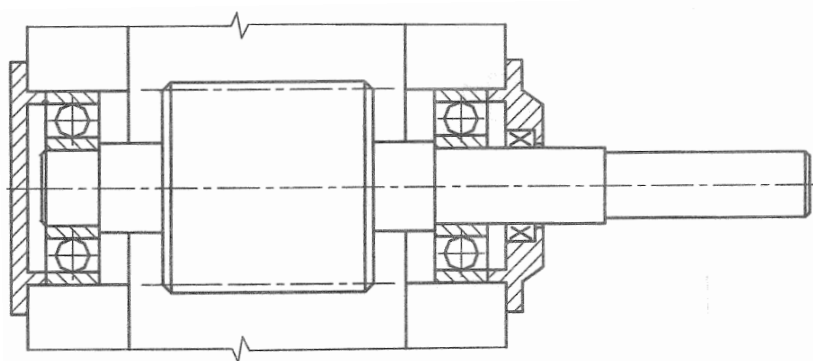
Súčasti uchytené na hriadeľoch, napríklad ozubené kolesá, kotúče spojok, statory u elektromotorov zaťažujú ložiská radiálnymi a niekedy aj axiálnymi silami. Axiálne sily sa musia zachytiť cez oba krúžky a valivé telieska. Obvykle axiálnu silu zachytáva iba jedno z ložísk.



Obrázok č. 6 –

Uloženie hriadeľa s jedným pevným a jedným posuvným vonkajším krúžkom [4]

Riešenie podľa obrázku č.6 umožňuje posuv pravého ložiska v dôsledku rozťažnosti hriadeľa teplom. Je vhodné hlavne pre dlhé hriadele. Vnútorne krúžky musia byť poistené pomocou poistných krúžkov a vonkajší krúžok ľavého ložiska je uchytený v oboch smeroch. Axiálnu silu prenáša iba ľavé ložisko.

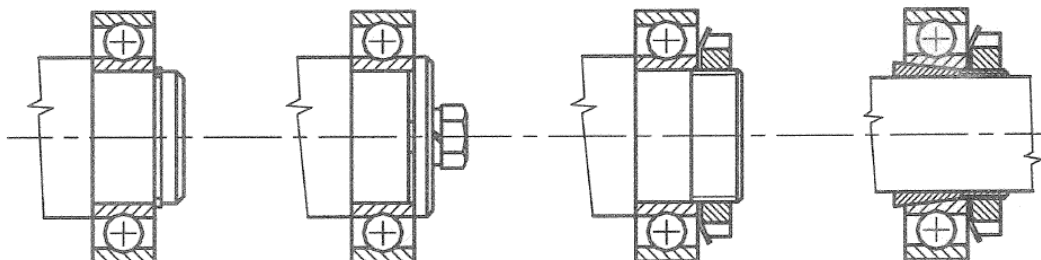


Obrázok č. 7 –

Uloženie hriadeľa s pevnými vonkajšími kružkami na oboch stranách [4]

Pokiaľ sú oba vonkajšie krúžky uchytené pevne pomocou oboch vík, viz. obrázok č.7, potom pôsobiacu axiálnu silu zachytí buď ľavé alebo pravé ložisko. Vnútorne krúžky ložísk

nie je nutné poistiť. Toto riešenie je vhodné pre kratšie hriadele a pre hriadele s rozoberateľnými ložiskami (kuželíkové, s kosouhlým stykom). Prípadnú tepelnú rozťažnosť hriadeľa sa dá zaistiť malou vôľou medzi vekom a ložiskom (0,1 až 0,2 mm). Poistenie vnútorných krúžkov je možné uskutočniť podľa obrázka č.8.



Obrázok č.8 – Poistenie vnútorného krúžku [4]

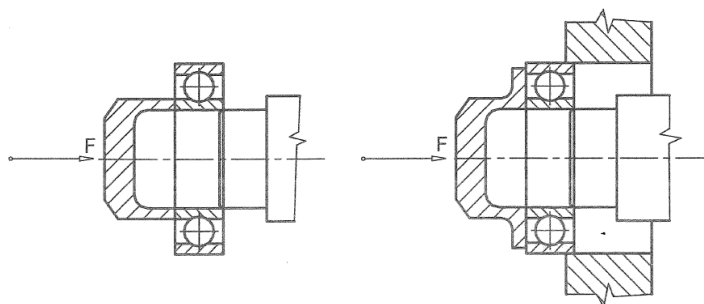
Mazanie a tesnenie:

Pre valivé trenie nie je mazanie nutné. Uplatní sa však u šmykového trenia, ktoré existuje medzi kľetkou a valivými telieskami. Ďalšou funkciou mazania je chladenie ložísk, ochrana proti korózii a pri mazaní tukom aj zabráneniu prístupu nečistôt. Mazanie tukom je výhodné z hľadiska jednoduchšieho tesnenia hriadeľa a pre nižšie prevádzkové teploty. Mazaním olejom sa používa zvyčajne tam, kde sú ložiská v uzavretom a utesnenom priestore a olejom sa maže ďalšia súčasť, napríklad ozubené kolesá.

Pre tesnenie hriadeľa pri mazaní tukom je možné použiť plstený krúžok. Pri mazaní olejom sa používajú hriadeľové tesniace krúžky (guferá). Hriadeľ má v mieste krúžku toleranciu $h8$ a drsnosť $Ra = 0,2$ až $0,4$. Diera pre krúžok má toleranciu $H8$ a drsnosť $Ra = 1,6$ až $3,2$.

Montáž a demontáž:

Pri montáži sa sily nesmú prenášať cez valivé telieska. Vhodné sú rôzne prípravky ako na obrázku č.9. Pre demontáž, ak chceme ložisko ešte použiť, platia rovnaké zásady. Používajú sa mechanické sťahováky, ktoré uchopia oba krúžky.



Obrázok č. 9 – Montáž ložísk [4]

1.3 Výpočet ložísk

Výpočet ložísk namáhaných dynamicky (prevádzka s bežnými otáčkami a rôznymi druhmi prevádzky) je odlišný od výpočtu ložísk namáhaných staticky (prevádzka s veľmi malými otáčkami alebo kývavým pohybom). Ďalej sa budeme zaoberať iba ložiskami namáhanými dynamicky.

U ložísk sa kontroluje ich základná trvanlivosť. Je to počet prevádzkových hodín alebo otáčok, kým sa prejaví prvé známky únavy povrchu materiálu krúžkov alebo valivých teliesok. Pre rôzne typy zariadení je požadovaná iná hodinová trvanlivosť.

Požadovaná hodinová trvanlivosť	Druh zaťaženia
4000 až 15 000 hodín	Stroje s prerušovaným chodom
20 000 až 30 000 hodín	Obrábacie stroje
40 000 až 60 000 hodín	Stroje pre ťažkú alebo nepretržitú prevádzku
100 000 až 200 000 hodín	Stroje s požadovanou vysokou spoľahlivosťou

Tabuľka č. 1 – Závislosť hodinovej trvanlivosti na type zariadenia [4]

Životnosť je skutočná doba prevádzky ložiska až do jeho vyradenia z iných dôvodov, než sú známky únavy. Napríklad hlučnosť, veľká radiálna vôľa. Môže byť kratšia než je základná trvanlivosť, napríklad vplyvom preťaženia alebo nesprávnou montážou, ale môže byť aj dlhšia. Známky únavy materiálu dráh a teliesok sú mikroskopické trhlinky na ich povrchu, ktoré musia vykazovať minimálne 90% ložísk zo skúšobnej skupiny 20 až 30 kusov.

Základná hodinová trvanlivosť sa určí podľa vzťahu:

$$L_h = \frac{16\,666}{n} \cdot \left(\frac{C}{F_e}\right)^p \quad F_e = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

L_h = Základná hodinová trvanlivosť [hod]

C = Základná dynamická únosnosť [N]

F_e = Dynamické ekvivalentné zaťaženie [N]

n = Otáčky [min^{-1}]

p = mocniteľ podľa druhu ložiska [1]

F_r = Radiálne zaťaženie ložiska [N]

F_a = Axiálne zaťaženie ložiska [N]

X, Y = Súčinitele podľa druhu ložiska [1]

Postup pri návrhu ložiska:

- Väčšinou priemery hriadeľa pre ložisko poznáme. Ak nie, určíme ich predbežne z pevnostnej rovnice pre namáhanie hriadeľa v krute:
$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau_{Dk} \quad W_k = 0,2 \cdot d^3 \quad \tau_{Dk} = 15 \text{ až } 45 \text{ MPa}$$
- Podľa prímeru hriadeľa sa volí veľkosť ložiska a z katalógu sa určí základná dynamická a statická únosnosť C , C_0 .
- Určia sa reakcie v ložisku F_r , F_a . (Hriadeľ predstavuje nosník na dvoch podporách)
- Stanovia sa koeficienty X , Y .
- Vypočíta sa základná trvanlivosť L_h a porovná sa s požadovanou trvanlivosťou.

Iná možnosť postupu je voliť ložisko podľa vypočítanej základnej dynamickej únosnosti, pokiaľ poznáme priemer hriadeľa a je zvolená L_h .

Reakcie F_r , a F_a je nutné násobiť súčiniteľmi prídavných síl f_d , f_k , f_p . Ich veľkosť závisí na druhu stroja a druhu prevodov.

$$f_k = 1,05 \text{ až } 1,3 \quad f_d = 1 \text{ až } 2 \quad f_p = 1,1 \text{ až } 1,3 \text{ ozub. remene a } 1,2 \text{ až } 2,5 \text{ klinové remene}$$

Kapitolu 2 som čerpal z literatúry [4].

2 Trojfázový asynchrónny motor

Trojfázový asynchrónny motor je výrobne jednoduchý a preto najlacnejší elektrický motor s veľkou mierou spoľahlivosti. Je najčastejšie používaným motorom pre najrôznejšie aplikácie. Jeho nevýhodou je ale veľký prúdový náraz do siete pri rozbehu.

Konštrukcia asynchrónneho elektromotora sa skladá zo statora a rotora. Stator a rotor sú zložené z dynamových plechov, v ktorých sú vyrazené drážky pre vinutie. Podľa prevedenia rotora sa delia na:

- Motory s kotvou na krátko
- Motory s krúžkovou kotvou

Rotor s kotvou nakrátko má rotorové vinutie zhotovené z tyčí, ktoré sú na oboch koncoch nakrátko spojené s vodivými kruhmi. Materiál rotorových kliebok je vo väčšine prípadov hliník, zriedka sa používa aj meď.

Motor s krúžkovou kotvou má v rotorových drážkach vložené trojfázové vinutie. Začiatky vinutia sú vyvedené na tri navzájom odizolované krúžky umiestnené na hriadieli a cez tieto krúžky a zberacie kartáče je vinutie pripojené k regulačným odporom.

Stupeň krytia asynchrónnych motorov je u bežných prevedení IP55, s povrchovým chladením vlastným ventilátorom.

2.1 Princíp činnosti asynchrónneho motora

Po pripojení trojfázového statorového vinutia na napájaciu sieť, začne prúd prechádzajúci statorovým vinutím vytvárať točivé magnetické pole. Rýchlosť otáčania tohto magnetického poľa závisí na frekvencii napájacej siete a na počtu pólových dvojíc stroja.

Indukčné čiary točivého magnetického poľa pretínajú vodiče a indukujú v nich napätie. Napätie indukované v rotore vyvolá v uzavretom rotorovom vinutí prietok prúdu. Na rotorové vinutie, nachádzajúce sa v magnetickom poli a pod prúdom, pôsobí mechanická sila. Na základe pôsobenia tieto sily sa začnú vychyľovať vodiče v smere otáčania magnetického poľa. Pri postupnom náraste otáčok sa znižuje relatívny pohyb vodičov voči točivému magnetickému poľu a tým sa znižuje indukované napätie a prúd. S menším napätím a prúdom sa zníži i sila, ktorá pôsobí na vodič v magnetickom poli. Tým nastane stav ustálenia otáčok rotora na určitej hodnote, ktorá je ale menšia než sú synchronne otáčky. Synchronných otáčok nie je možné dosiahnuť, pretože by sa prestalo indukovať

napätie a tým by prestala pôsobiť sila, ktorá vytvára točivý moment. Prevádzka nezaťaženeho elektromotora sa nazýva prevádzka na prázdno. Aj napriek tomu sú vždy otáčky o niečo menšie ako synchronne. Toto spomalenie v otáčkach sa nazýva sklz.

Podľa počtu pólových dvojíc ($2p$) rozlišujeme otáčky motora:

- $1 \times 2p = 2$ je $n = 3000 \text{ min}^{-1}$
- $2 \times 2p = 4$ je $n = 1500 \text{ min}^{-1}$
- $3 \times 2p = 6$ je $n = 1000 \text{ min}^{-1}$
- $4 \times 2p = 8$ je $n = 750 \text{ min}^{-1}$

Použitie elektromotora:

Elektromotor má tri základné druhy použitia. Prvá je ako elektromotor, keď dochádza k odoberaniu elektrickej energie zo siete. Druhá je ako generátor, stroj musí byť poháňaný hnacím strojom otáčkami vyššími ako synchronne. Tretím spôsobom prevádzky je brzda. Počas tejto prevádzky dochádza k odberu väčšieho prúdu než je prúd na krátko (prúd odoberaný zo siete pri zastavenom rotore) a tým dochádza k značnej tepelnej záťaži elektromotora. Z nášho pohľadu je omnoho výhodnejšie použiť pre brzdenie elektromagnetickú brzdú. Túto brzdú môžeme zároveň použiť ako pre ponechanie zariadenia v požadovanej polohe aj po vypnutí od elektrickej siete. Elektromagnetická brzda nám teplotne nezaťažuje elektromotor a tým nedochádza k zbytočnému ohrievaniu valivých ložísk.

Zapnutie asynchrónneho motora:

Zapnutie asynchrónnych motorov je možné priamym pripojením na sieť, ktoré je sprevádzané veľkým prúdovým nárazom. Pri motoroch s kotvou na krátko sa obmedzuje znížením napätia a tým aj momentu. Ďalšou možnosťou je prepínanie statorového vinutia z hviezdy do trojuholníka, kedy sa pri zapojení do hviezdy zníži napätie fázy v pomere $1:\sqrt{3}$ a záberový prúd a moment sa zníži v pomere $1:3$. Motor sa rozbehne v zapojení do hviezdy do prevádzkových otáčok a potom sa prepne do zapojenia elektromotora do trojuholníka.

Zmena otáčok:

Riadenie otáčok asynchrónneho motora sa robí buď zmenou napájacieho napätia, ale omnoho častejšie sa dnes používajú meniče kmitočtu napájacieho napätia. Zmena frekvencie napájacích napätí priniesla so sebou ďalší negatívny jav a tým sú ložiskové prúdy. Ložiskové prúdy nám do značnej miery ovplyvňujú životnosť ložísk. Ich vplyvom

dochádza k poškodeniu obežných dráh v ložiskovom krúžku a rýchlej havárii ložiska. Pri napájaní asynchrónneho motora z meniča kmitočtu je nutná vhodná forma vibrodiagnostiky ložísk. Včasnou identifikáciou sa dá predísť poškodeniu vinutia po deštrukcii zasiahnutého ložiska.

Popis častí elektromotora:

1. Ochrana motora – spojenie motora a svorkovnicovej skrine
2. Vinutie a izolačný systém motora
3. Chladenie motora – ventilátor
4. Ložiská motora
5. Hriadeľ a rotor motora
6. Kostra motora
7. Ukotvenie motora
8. Výrobný štítok motora



Obrázok č. 10 – Elektromotor Siemens rady 1LE1 [7]

2.2 Ložiskové uzly elektromotora

Asynchrónny motor má v bežnom prevedení dva ložiskové uzly. V každom z týchto uzlov je umiestnené jedno valivé ložisko.

Predný ložiskový uzol:

Pre ložiskový uzol asynchrónneho elektromotora je najvhodnejšia voľba guľôčkových ložísk. Ako axiálne pevné, sa volí ložisko na prednej strane motora (strana ventilátora). Na hriadeli je z vonkajšej strany elektromotora zaistené poistným krúžkom proti posunutiu. U menších ložísk, ktoré nie sú v prevedení pre domazávanie, ale majú tukovú náplň pre celú dobu životnosti, je zaistenie v ložiskovom štíte tvorené z vnútornej strany vnútorným poistným krúžkom. Z vonkajšej strany je ložiskové veko, ktoré môže tvoriť jeden diel spoločne s ložiskovým štítom. U väčších ložísk je výhodné použiť ložiská s prevedením ložiskových štítov pre domazávanie. Konštrukcia ložiskovej komory by mala byť taká, aby mohlo nové mazivo vytlačiť spotrebované a znehodnotené plastické mazivo von.

Zadný ložiskový uzol:

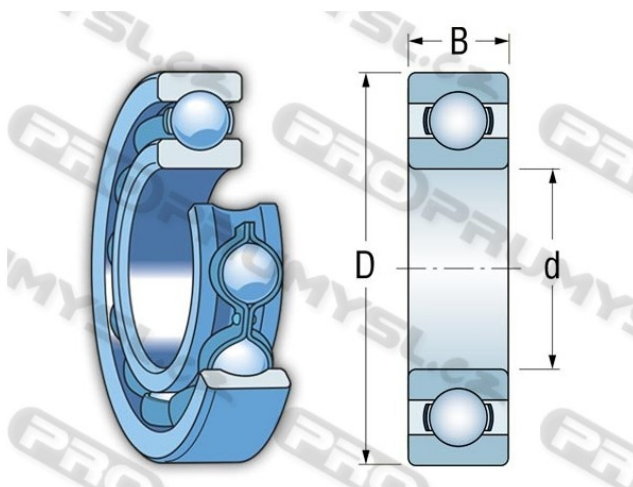
Na strane pohonu (zadná strana motora) je guľôčkové ložisko s axiálnou vôľou a s axiálnym predpätím, vytvoreným ložiskovou pružinou. Toto ložisko nemusí byť na hriadeli z vonkajšej strany zaistené poistným krúžkom. V ložiskovom štíte je potom vôľa v axiálnom smere pre možnosť posunutia ložiska z dôvodu výrobných tolerancií. Za prevádzky dochádza taktiež k dĺžkovej zmene vplyvom tepelných rozťažností materiálu. V prevedení bez domazávania, nie je z vnútornej strany motora v ložiskovom štíte poistný krúžok, pretože by nebolo možné zaistiť axiálny posun ložiska na zadnej strane smerom do vnútra elektromotora. U väčších ložísk, sa ako na prednej strane robí prevedenie s domazávaním. Aj v tomto prípade musí byť zaistená dostatočná axiálna vôľa medzi guľôčkovým ložiskom a vnútorným ložiskovým vekom. Prevedenie s guľôčkovým ložiskom je vhodné pre pohony so spojkou alebo pre malé radiálne zaťaženia. Ak je pre aplikáciu volený pohon remeňovým prevodom, volí sa miesto guľôčkového ložiska, ložisko valčekové. Rozmery guľôčkového ložiska 6317 sú rovnaké ako rozmery valčekového ložiska rady NU317. Posledné dvojčíslo v označení ložiska určuje jeho vnútorný priemer. Ten dostaneme po vynásobení tohto dvojčísla číslom 5. Takže ložisko rady 17, majú vnútorný priemer $17 \times 5 = 85$ mm. Pri použití valčekového ložiska je nutné axiálne zaistiť vonkajší krúžok valčekového ložiska. Axiálny posun je u tohto prevedenia zaistený možnosťou posunu vnútorného krúžku ložiska, proti vonkajšiemu krúžku ložiska, v ktorom je umiestnená kľetka s valčekmi. Kapitolu 3 som čerpal z literatúry [17].

3 Aktuálny stav

Ku dnešku montuje firma Siemens s.r.o. do svojich motorov štandardne dodávané ložiská SKF Explorer. V tejto kapitole som popísal ich vlastnosti a parametre, ktoré udáva výrobca, firma SKF vo svojich katalógoch. Presnejšie som sa zameral na popis ložiska SKF Explorer 6312-2Z/C3, pretože práve toto ložisko sme testovali na typovej skúške motora.

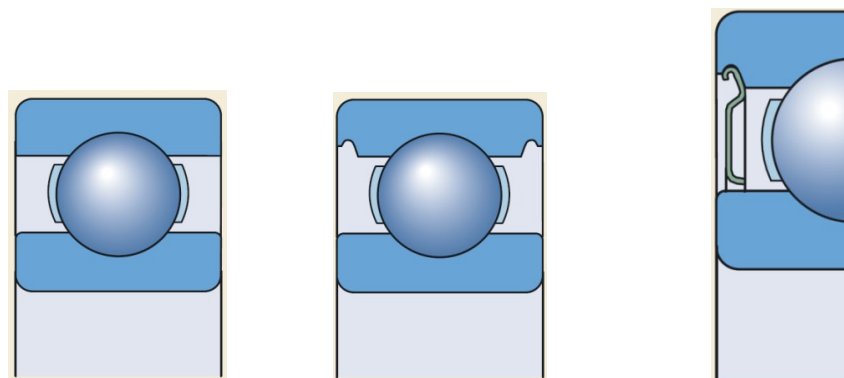
3.1 Charakteristika a konštrukcia ložiska SKF Explorer 6312-2Z/C3

Jednoradové guľôčkové ložiská sú veľmi univerzálne ložiská. Majú jednoduchú konštrukciu, sú nerozoberateľné, môžu pracovať s vysokými a veľmi vysokými otáčkami, sú neobyčajne odolné a vyžadujú si zanedbateľnú údržbu. Sú určené pre vysoké výkony a vyznačujú sa tichým chodom.



Obrázok č. 11 – Ložisko SKF Explorer 6312 [20]

Konštrukčne sa ložisko vyznačuje hlbokými obežnými dráhami a vysokým stupňom primknutia medzi obežnými dráhami a guľôčkami, čo umožňuje prenášať okrem radiálneho zaťaženia aj axiálne zaťaženie v oboch smeroch a to aj pri vysokých otáčkach. Jednoradové guľôčkové ložisko predstavuje najpoužívanejší typ ložiska. Z tohto dôvodu sa vyrába v rôznych prevedeniach a veľkostiach.



Obrázok č. 12 – Štandardné ložisko, ložisko so zápichmi, ložisko s krycím plechom [5]

Ložisko SKF Explorer 6312 je štandardne nezakryté ložisko bez tesnenia. Z výrobných dôvodov môžu byť nezakryté ložiská týchto rozmerov s vonkajšími krúžkami opatrenými zápichmi alebo sa tiež vyrábajú v prevedení s krycimi plechmi alebo tesnením. Ložiská s krycimi plechmi majú prídavné označenie Z alebo 2Z, sú vyrábané v dvoch prevedeniach v závislosti na rade a veľkosti ložiska. Krycie plechy sú opatrené valcovitou časťou, ktorá tvorí spolu s osadením vnútorného krúžku širokú tesniacu špáru. Zakryté ložiská sú určené predovšetkým pre uloženie s rotujúcim vnútorným krúžkom. Pokiaľ sa otáča aj vonkajší krúžok, hrozí nebezpečenstvo, že pri vysokých otáčkach dôjde k úniku plastického maziva. Ložisko je dodávané s náplňou maziva, ktorá postačuje na celú dobu trvanlivosti a nevyžaduje domazávanie. Ložisko by nemalo byť vymývané a ani ohrievané na teplotu vyššiu ako je teplota 80 °C. Plastické mazivo vyplňuje približne 25 až 35 % voľného priestoru ložiska.

3.2 Základné údaje

	Označenie	Hodnota	Jednotka
Hlavné rozmery	d	60	mm
	D	130	
	B	31	
Dynamická únosnosť	C	85,2	kN
Statická únosnosť	C ₀	52	
Medzné únavové zaťaženie	P _u	2,2	
Referenčné otáčky	n _{ref}	11 000	min ⁻¹
Medzné otáčky	n _{medz}	7 000	
Hmotnosť	m	1,7	kg

Tabuľka č. 2 – Katalógové dáta ložiska [5]

Rozmery:

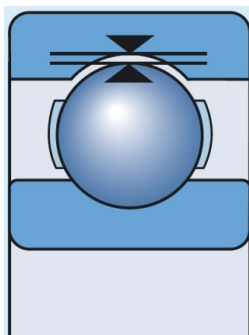
Hlavné rozmery ložiska zodpovedajú ISO 15:1998.

Tolerancie:

Ložisko triedy Explorer je vyrábané s vyššou presnosťou ako je normálna presnosť podľa ISO. Presnosť rozmerov zodpovedá triede presnosti P6 s výnimkou tolerancie šírky, ktorá je podstatne užšia a činí 0/-60 μm . Presnosť chodu zodpovedá triede presnosti P5. Tolerancie odpovedajú ISO 492:2002.

Vnútorná vôľa:

Ložisko je štandardne vyrábané s nominálnou vnútornou radiálnou vôľou. Hodnoty radiálnej vnútornej vôle sú 5 až 20 μm a zodpovedajú ISO 5753:1991. Uvedené hodnoty platia pre nenamontované ložisko a nulové meracie zaťaženie.



Obrázok č. 13 – Vnútorná vôľa ložiska [5]

Nesúosovosť:

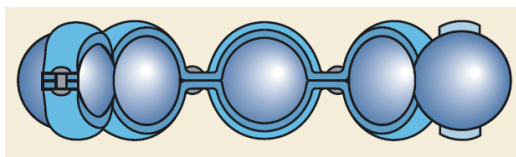
Ložisko nie je vhodné pre vyrovnávanie nesúosovosti. Prípustné naklopenie vnútorného krúžku voči vonkajšiemu, ktoré nevyvoláva neprípustné prídavné zaťaženie v ložisku závisí na:

- Radiálnej vnútornej vôle ložiska za prevádzky
- Veľkosti ložiska
- Vnútornej konštrukcii
- Silách a momentoch, ktoré pôsobia na ložisko

Keďže vzájomná závislosť všetkých týchto vplyvov je veľmi zložitá, presné hodnoty nie je možné uviesť. V závislosti na rôznych vplyvoch však činí prípustné naklopenie z pravidla 2 až 10 uhlových minút. Akékoľvek naklopenie ložiskových krúžkov podstatne zvýši hlučnosť a skráti prevádzkovú trvanlivosť ložiska.

Klietka ložiska:

Pre uloženie, ktoré pracuje nepretržite v náročných podmienkach je ložisko dodávané s lisovanou a nitovanou oceľovou klietkou, vedenou guľôčkami.



Obrázok č. 14 – Klietka ložiska [5]

Minimálne zaťaženie:

Na ložisko s bodovým stykom musí pôsobiť určité minimálne zaťaženie, aby bola zaistená jeho uspokojivá prevádzka. To platí aj pre guľôčkové ložiská, predovšetkým v prípade kedy majú pracovať pri vysokých otáčkach, s vysokým zrýchlením alebo pri náhlych zmenách smeru pôsobenia zaťaženia. Za týchto podmienok môžu mať zotrvačné sily guľôčok a klietky, ako aj trenie v mazive negatívny vplyv na podmienky odvaľovania a spôsobiť poškodenie valivých teliesok a obežných dráh preklzávaním. Požadované minimálne radiálne zaťaženie môže byť pre takéto prípady stanovené podľa vzťahu:

$$F_{rm} = k_r \cdot \left(\frac{v \cdot n}{1000} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{d_m}{100} \right)^2$$

F_{rm} = minimálne radiálne zaťaženie [kN]

k_r = súčiniteľ minimálneho zaťaženia = 0,025

v = viskozita oleja pri prevádzkovej teplote [mm²/s]

n = otáčky [min⁻¹]

d_m = stredný priemer ložiska = 0,5 · (d + D)[mm]

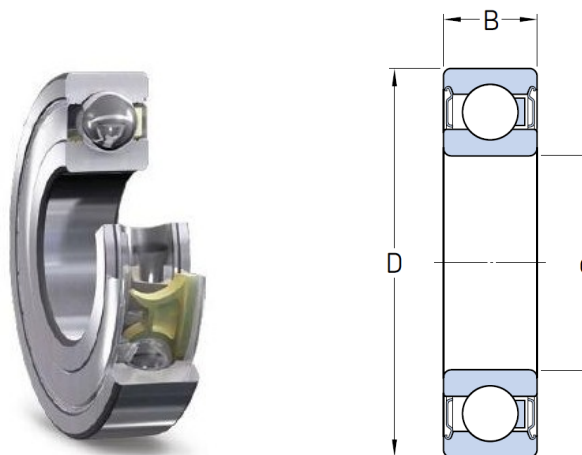
Pri rozbehu za nízkych teplôt alebo pri použití maziva s vysokou viskozitou, môže byť potrebné ešte vyššie minimálne zaťaženie. Hmotnosť súvisiacich dielov prenášaná ložiskom spolu s vonkajšími silami je často vyššia než je požadované minimálne zaťaženie. Pokiaľ tomu tak nie je, na ložisko musí pôsobiť prídavné radiálne zaťaženie. V uloženiach s guľôčkovými ložiskami je možné dosiahnuť axiálneho predpätia vzájomným nastavením vnútorného a vonkajšieho krúžku voči sebe alebo pomocou pružín. Kapitolu 4 som čerpal z literatúry [5].

4 Navrhované technické riešenie

Každým dňom je stále dôležitejšie a aj nutné šetriť energiou a preto akékoľvek technické riešenie, ktoré prispeje k zníženiu energie je považované za prínos pre strojárstvo. Nová trieda energeticky účinných ložísk SKF E2 bola vyvinutá za využitia poznatkov v oblasti tribológie, preto boli tieto ložiská navrhnuté aby pracovali s nízkym trením. Tým sa zvýšila energetická úspornosť a po montáži do motora sa to prejavuje menším oteplením ložísk a nižšími mechanickými stratami. V tejto kapitole popisujem katalógové vlastnosti a parametre ložiska SKF E2.6312-2Z/C3, ktoré sme neskôr overili v typovej skúške elektromotora.

4.1 Charakteristika a konštrukcia ložiska SKF E2.6312-2Z/C3

Je to prvý typ ložiska, ktoré predstavuje novú výkonnostnú triedu E2. Výrobca udáva, že v tomto ložisku sú mechanické straty minimálne o 30 % nižšie ako u štandardných ložísk rovnakej veľkosti.



Obrázok č. 15 – Ložisko SKF E2.6312 – 2Z/C3 [6]

Ložisko je vhodné pre malé až stredné zaťaženia. Je štandardne opatrené na oboch stranách krytmi z oceleového plechu a je naplnené plastickým mazivom SKF, ktoré má zaručovať nízku hlučnosť a nízke trenie. Plastické mazivo vyplňuje približne 25 až 35 % voľného ložiskového priestoru a je určené na celú dobu trvanlivosti. Nemusí byť domazávané a nemalo by byť vymývané ani ohrievané na teplotu vyššiu ako 80 °C. Ložisko je určené predovšetkým pre uloženia s rotujúcim vnútorným krúžkom. Typické príklady uloženia sú elektromotory, čerpadlá, dopravníky a ventilátory. Ak sa bude otáčať aj vonkajší krúžok, pri vysokých otáčkach, môže dôjsť k úniku maziva z ložiskového

priestoru. Má nižšiu spotrebu maziva ako porovnávané ložisko SKF Explorer a môže dosiahnuť vyššiu do konca až dvojnásobnú prevádzkovú trvanlivosť. Ak napríklad uloženie pracuje až do úplného zlyhania, je možné, že ložisko vydrží dlhšie v prevádzke ako ostatné diely uloženia.

4.2 Základné údaje

	Označenie	Hodnota	Jednotka
Hlavné rozmery	d	60	mm
	D	130	
	B	31	
Dynamická únosnosť	C	81,9	kN
Statická únosnosť	C_0	52	
Medzné únavové zaťaženie	P_u	2,2	
Referenčné otáčky	n_{ref}	13000	min^{-1}
Medzné otáčky	n_{medz}	6500	
Hmotnosť	m	1,7	kg

Tabuľka č. 3 – Katalógové dáta ložiska [6]

Rozmery:

Hlavné rozmery energeticky účinného guľôčkového ložiska odpovedajú ISO 15:1998 a teda je rozmerovo zameniteľné s guľôčkovým ložiskom rovnakej veľkosti odpovedajúcej rozmerovej rady.

Tolerancie:

Presnosť rozmerov odpovedá triede presnosti P6. Tolerancia šírky je zúžená na 0/-60 μm . Presnosť chodu odpovedá triede presnosti P5.

Vnútorná vôľa:

Ložisko je štandardne vyrábané s radiálnou vnútornou vôľou C3.

Nesúosovosť:

Energeticky účinné guľôčkové ložisko má rovnaké prevádzkové vlastnosti ako štandardné guľôčkové ložisko. V závislosti na rôznych vplyvoch však činí prípustné naklopenie ložiska z pravidla 2 až 10 uhlových minút. Akékoľvek naklopenie ložiskových krúžkov podstatne zvýši hlučnosť a skráti prevádzkovú trvanlivosť ložiska.

Klietka ložiska:

Konstruktúra klietky predstavuje jednu z najdôležitejších predností energeticky účinných guľôčkových ložísk. Výsledkom celkom nového prístupu ku konštrukcii klietky je ľahšia klietka, ktorá je odolnejšia voči deformácii za prevádzky. Je vyrobená z kompozitného polyméru zosilneného sklenenými vláknami a odolná proti vysokým teplotám. Klietka ložiska je otvorená a vedená guľôčkami. Klietka v prevádzke vykazuje podstatne menšie deformácie ako štandardná polyamidová klietka.



Obrázok č. 16 – polyamidová klietka štandardného ložiska

a ložiska E2 pri otáčkach 8000 min^{-1} [6]

Minimálne zaťaženie:

Na ložisko musí vždy pôsobiť určité minimálne zaťaženie. Požadované minimálne radiálne zaťaženie môže byť určené zo vzťahu:

$$F_{rm} = \frac{k_r}{T} \cdot (5,2 \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{d_m}{100}\right)^2$$

F_{rm} = minimálne radiálne zaťaženie [kN]

k_r = súčiniteľ minimálneho zaťaženia = 0,025

T = prevádzková teplota [°C]

n = otáčky [min^{-1}]

d_m = stredný priemer ložiska = $0,5 \cdot (d + D)$ [mm]

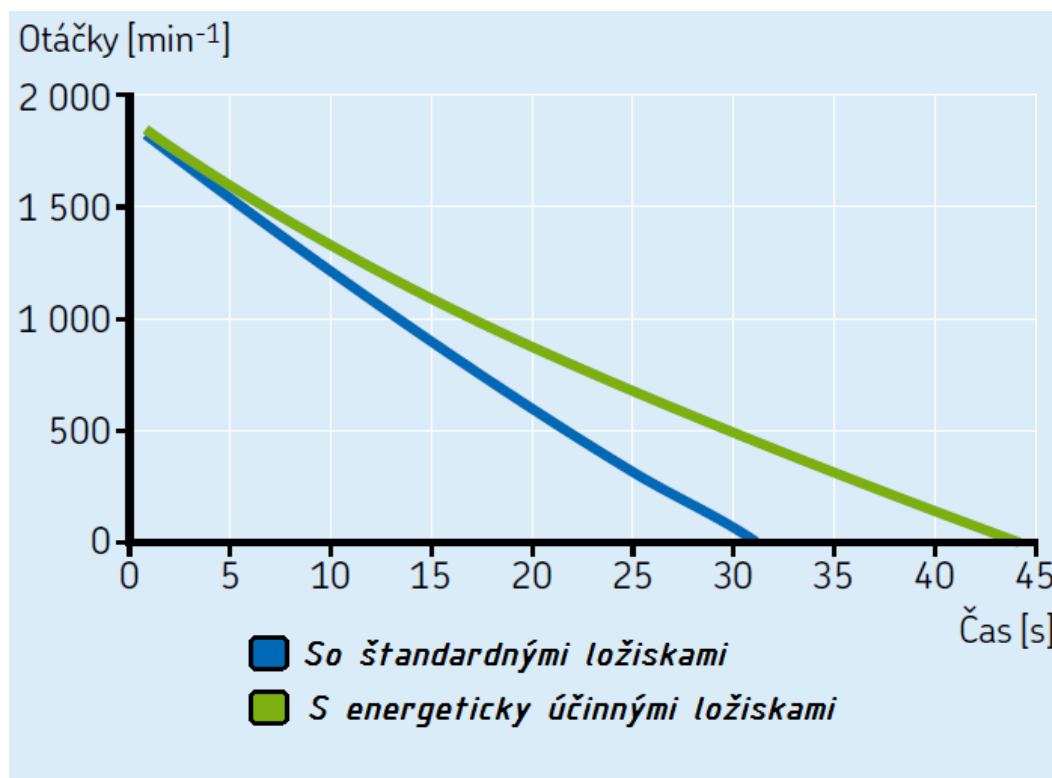
Pri rozbehu za nízkych teplôt, môže byť potrebné ešte vyššie minimálne zaťaženie. V niektorých uloženiach ako sú napríklad uloženia v elektromotoroch je radiálne zaťaženie nedostatočné. V nich je možné vyvodiť axiálne predpätie pružinami. Kapitola 5 som čerpal z literatúry [6].

5 Porovnanie vlastností ložísk SKF Explorer a SKF E2

Trenie v ložisku má zásadný vplyv na vývin tepla v ložisku a teda aj na prevádzkovú teplotu. Trenie závisí na zaťažení a niekoľkých ďalších faktoroch, z ktorých sú najdôležitejšie typ ložiska, jeho veľkosť, prevádzkové otáčky, vlastnosti maziva a jeho množstvo. Celkový valivý odpor v ložisku sa skladá z valivého kontaktu v mieste styku medzi valivými telieskami a kľetkou, na vodiacich plochách pre valivé telieska alebo kľetky, z trenia v mazive a šmykového trenia tesnenia u ložísk s tesnením.

5.1 Mechanické straty

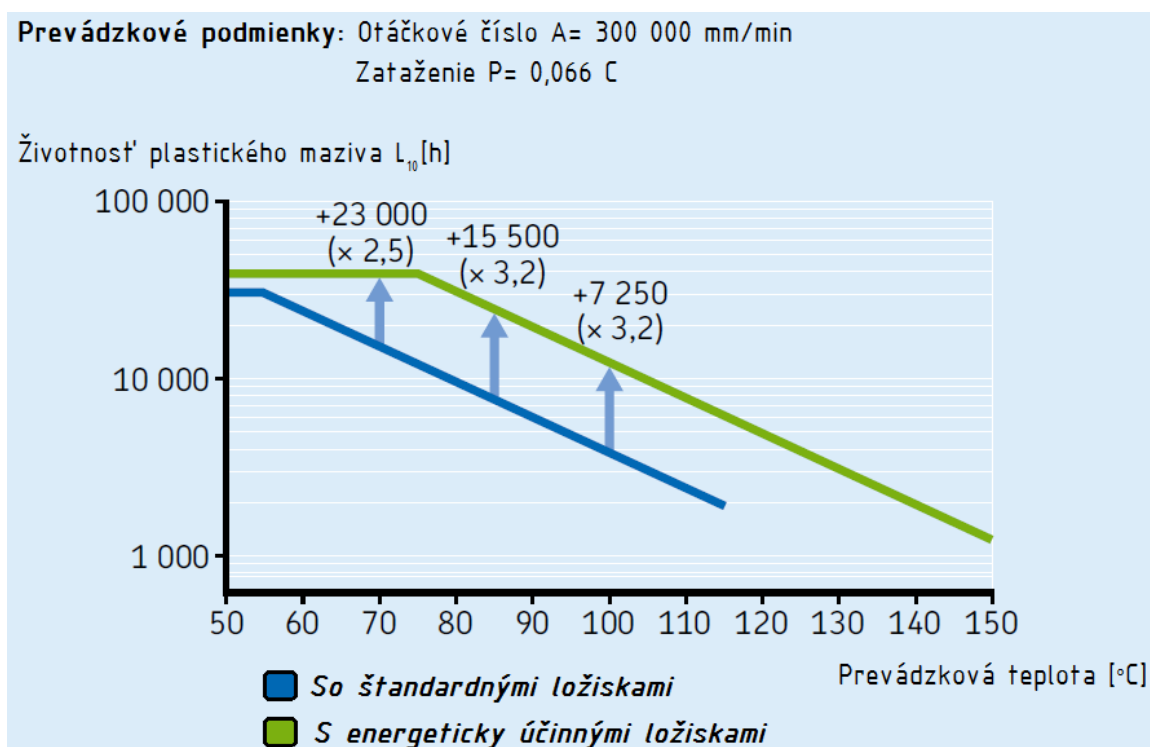
Graf č.1 ukazuje účinnosť energeticky účinných guľôčkových ložísk v elektromotore s výkonom 3 kW. V tomto prípade boli do motora namontované štandardné guľôčkové ložiská, ktoré boli neskôr nahradené ložiskami E2. V oboch prípadoch bol meraný dobeh po prerušení prívodu energie do motora. Výrobca uvádza, že ložiskami E2 sa dobeh predĺžil o 50 %.



Graf č. 1 – Dobeh elektromotora [6]

5.2 Životnosť plastického maziva

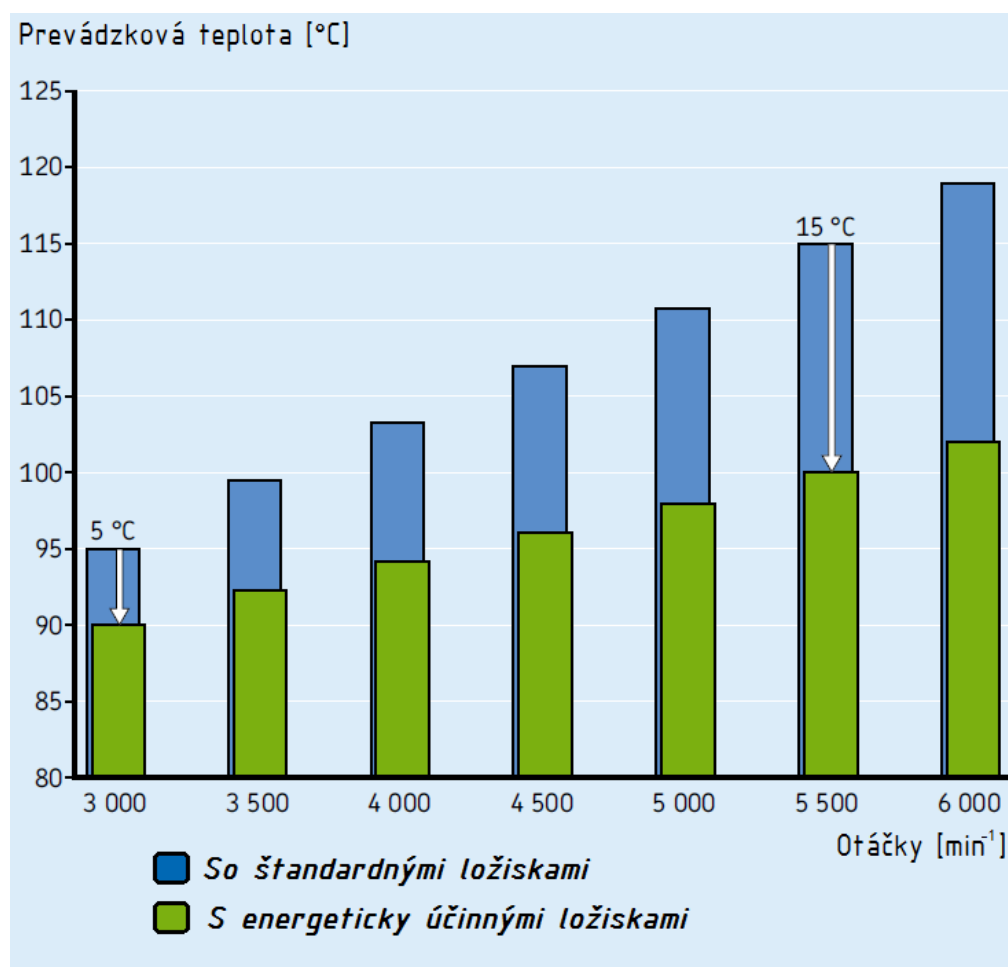
Dlhšia životnosť plastického maziva znamená dlhšiu prevádzkovú trvanlivosť. V uloženiach, na ktoré pôsobí normálne zaťaženie, zriedka dochádza k únave materiálu. Hlavný obmedzujúci faktor predstavuje životnosť maziva, ktoré určuje trvanlivosť ložiska. V porovnaní so štandardným zakrytým ložiskom, môže ložisko E2 dosiahnuť viac ako dvojnásobnej strednej doby medzi poruchami a to vďaka nižšiemu vyvíjanému teplu v ložisku a za použitia plastického maziva SKF so špeciálnym zložením, ktoré sa vyznačuje nízkym trením. Porovnanie je zobrazené na grafe č.2.



Graf č.2 – Porovnanie životnosti plastického maziva [6]

5.3 Prevádzková teplota

Trenie spomaľuje pohyb a má za následok energetickú stratu, ktorá sa prejaví v podobe teplotného prírastku vytváraného za prevádzky ložiska. Výrobca uvádza, že energeticky účinné guľôčkové ložiská v porovnaní so štandardnými vykazujú o 5 až 15 °C nižšiu teplotu v závislosti na otáčkach. Porovnanie je zobrazené v grafe č.3. Kapitola 6 som čerpal z literatúry [6].



Graf č.3 – Prevádzková teplota ložísk [6]

6 Typová skúška motora

Pre overenie parametrov energeticky účinných ložísk sme v spolupráci s firmou Siemens s.r.o. vykonali typovú skúšku motora. Touto skúškou sme overovali hodnovernosť uverejnených technických parametrov ložísk, ktoré udáva výrobca.

Parametre sme overovali na týchto meraniach:

- Meranie vibrácií motora
- Meranie hlučnosti motora
- Meranie oteplenia motora
- Meranie charakteristiky na prázdno

Merania boli vykonávané na nízkonapäťovom motore Siemens rady 1LE1:

- Typ motora – 1LE1 501-2AB63-4AA0
- Sériové číslo – 000003402
- Výkon – 37 [kW]
- Otáčky – 1465 [min^{-1}] (počet pólov – $2p = 4$)
- Napätie – 400 [V], 50 [Hz]
- Prúd – 69 [A]
- Krytie – IP55
- Trieda izolácie – F
- Druh zaťaženia – štandardné zaťaženie
- Tvar – IMB3
- Prevádzková teplota – -30 do +40 [°C]
- Hmotnosť – 240 [Kg]



Obrázok č. 17 – Meraný motor Siemens rady 1LE1 [autor]



Obrázok č. 18 – Štítok motora Siemens rady 1LE1 [autor]

7 Meranie vibrácií motora

Vibrodiagnostika patrí právom medzi hlavné súčasti technickej diagnostiky, pretože pomocou sledovania vibrácií dokážeme s vysokou presnosťou získať obraz o stave zariadenia a vďaka tomu efektívnejšie navrhnúť ďalšie opatrenia nutné pre ďalší spoľahlivý chod zariadenia. Vibrácie sú úzko prepojené s dynamickým namáhaním stroja a každá jeho časť je pomocou vibrácií diagnostikovateľná, jednou z diagnostikovateľných častí stroja sú aj ložiská. [11]

7.1 Vibrácie

Vibrácie sú prejavom chovania sa mechanických častí strojov, ktorým reagujú na pôsobenie vnútorných a vonkajších síl. Pretože väčšina závad rotačných strojov sa prejavuje nadmernými vibráciami, využívajú sa vibračné signály ako indikátory mechanického stavu strojov. Každá mechanická záhada alebo defekt generuje vibrácie svojím špecifickým spôsobom. Aby sa dala určiť ich príčina a zvoliť vhodné kroky k náprave, snahou je identifikovať o ktorý typ ide. Pri analýze vibračných signálov sa venuje pozornosť ich dvom zložkám, amplitúde a frekvencii. [18]

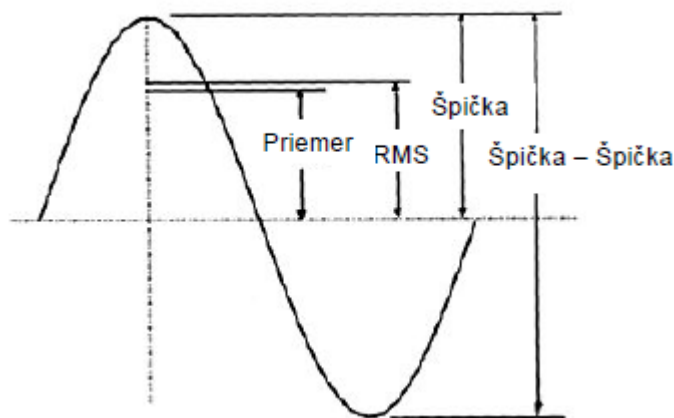
Frekvencia udáva početnosť istého javu v danom časovom úseku (jav prejavuje jeden vibračný cyklus). Podľa frekvencie vibrácií je možné usudzovať typ závady. Keď sa zistí frekvencia, pri ktorej dochádza k vibráciám, získa sa jasnejší obraz o príčine vibrácií.

Amplitúda je veľkosť vibračného signálu. Amplitúda vibračného signálu súvisí so závažnosťou závady. Amplitúda závisí na type stroja a je vo vzťahu k úrovni vibrácií dobrého alebo nového stroja. [18]

7.2 Vyjadrenie amplitúdy signálu

Ak porovnávame celkové hodnoty, musí byť jeden rovnaký spôsob merania amplitúdy signálu, ktorý určuje, ako je prevádzkané meranie. Meranie celkových vibrácií používa tieto vyjadrenia:

- Špičková hodnota (peak)
- Špička – špička (peak to peak)
- Priemerná hodnota (average)
- Efektívna hodnota (RMS)



Obrázok č. 19 – Vyjadrenie amplitúdy sínusového signálu [18]

Pri sínusovom signáli platia medzi jednotlivými spôsobmi vyjadrenia amplitúdy priame vzťahy:

- Špička $= 1,0$
- Efektívna hodnota $= 0,707 \cdot \text{špička (RMS)}$
- Priemerná hodnota $= 0,637 \cdot \text{špička}$
- Špička – špička $= 2 \cdot \text{špička (niekedy tiež rozkmit)}$

Špičková hodnota reprezentuje vzdialenosť medzi vrcholom vlny a nulovou úrovňou.

Špička – špička (rozkmit) je vzdialenosť medzi najvyšším a najnižším vrcholom vlny.

Priemerná hodnota je priemernou hodnotou amplitúdy priebehu vlny. Pri ideálnom sínusovom priebehu je rovná nule. Väčšina priebehov však nie je sínusová alebo nie sú symetrické k nulovej hodnote a vtedy je priemer nenulový.

RMS (efektívna hodnota) je odvodená matematickou cestou, porovnaním energií alebo výkonu jednosmerného a striedavého prúdu. Pri FFT (Fast Fourier Transformation) spektre sa jedná o druhú odmocninu súčtu štvorcov okamžitých hodnôt.

Špičková hodnota a hodnota špička – špička môžu byť buď priamo namerané alebo vypočítané z hodnoty RMS. Tento výpočet prevádzajú meracie prístroje v závislosti od ich nastavenia. Podkapitolu 7.2 som čerpal z literatúry [18].

7.3 Základné metódy vibrodiagnostiky

V tejto kapitole si pomenujeme základné metódy vibrodiagnostiky. Existujú rôzne spôsoby spracovania základného signálu, preto neexistuje jedna univerzálna metóda. Je

doporučené tieto metódy kombinovať a dostať tak ucelený obraz o stave a prípadnej poruche zariadenia.

Analýza signálu v časovej oblasti:

Časový priebeh zobrazuje krátku časovú vzorku nespracovaných vibrácií. Aj keď nebýva analýza časového priebehu taká užitočná ako iné spôsoby analýzy, môže poskytnúť kľúč k odhaleniu stavu stroja, ktorý nemusí byť vždy zrejmý z frekvenčného spektra alebo celkových vibrácií. [18]

Analýza FTT (Fast Fourier Transformation):

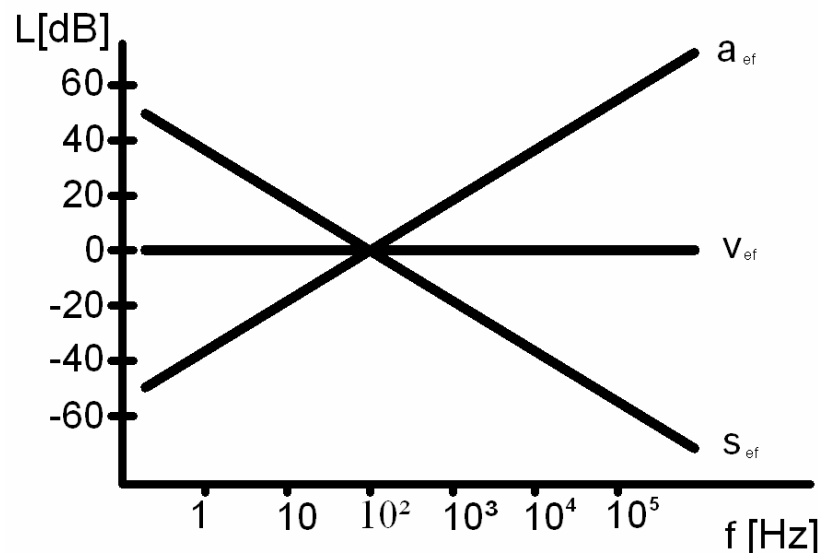
FTT spektrum dostaneme rozkladom časového signálu na jednotlivé amplitúdy s vlastnou frekvenciou. Ide o spoľahlivú a rýchlu metódu. Spektrá, ktoré sme namerali môžeme ďalej využívať pre trendovanie a k následnému určeniu schopnosti stroja pracovať v bezporuchovom režime. Podstatou FTT je voľba zvláštnej dĺžky záznamu, vďaka čomu dochádza ku značnému urýchleniu výpočtu.

Analýza signálu vo frekvenčnej oblasti:

Analýza odstraňuje nevýhody analýzy časového signálu, ale za predpokladu správneho použitia. Pri správnom použití môžeme na jednotlivých častiach zariadenia lokalizovať poruchy. Analýzou frekvenčnej oblasti dostaneme takzvané frekvenčné spektrum, v ktorom sú zobrazené veľkosti vibrácií na jednotlivých frekvenciách. Pokiaľ uplatníme úplnú frekvenčnú analýzu, dostaneme na výstupe ako aj amplitúdové tak aj fázové spektrá. Fázové spektrá sa využívajú na určenie typu nevyváženosti a pre samotné vyvažovanie.

7.4 Základné sledované veličiny kmitania

Medzi hlavné veličiny, ktoré sledujeme pri vibráciách, patrí odchýlka, rýchlosť a zrýchlenie. Z vyhodnotenia odchýlky zistíme možnosti rôznych vôlí v mechanizmoch, pretože tieto sú merateľné iba v nízkofrekvenčnej oblasti kmitov. Najlepší obraz o prenose škodlivého kmitania z hľadiska prenosu energie nám podá efektívna hodnota rýchlosti. V oblasti vysokofrekvenčných pásiem sa vyhodnocuje efektívna hodnota zrýchlenia. Graficky je toto rozloženie zobrazené na obrázku č.20.[8]



Obrázok č. 20 – Frekvenčné závislosti základných určujúcich veličín [8]

7.5 Snímače vibrácií

Pri meraní akejkoľvek veličiny charakterizujúcej vibrácie by mal výstupný signál čo najviac odpovedať priebehu mechanického kmitania. V dnešnej dobe sa uplatňujú iba snímače zrýchlenia, avšak existujú určité merania vyžadujúce si iné typy snímačov. Sú to napríklad tenzometry. Použitie tenzometrov je pre monitorovanie vibrácií obmedzené. Je to predovšetkým preto, že rýchlosť a výchylku ide jednoducho určiť použitím integrujúcich členov. [12]

Rozdelenie snímačov:

- Snímače kmitania, ktorých základom je takzvaná seizmická hmotnosť. Z pravidla sa montujú na konštrukciu stroja a ich výstup je mierou absolútnych vibrácií konštrukcie stroja.
- Snímače relatívnej odchýlky merajúce vibračnú odchýlku a strednú polohu medzi rotujúcimi a nerotujúcimi prvkami.

Rozdelenie snímačov podľa meranej veličiny:

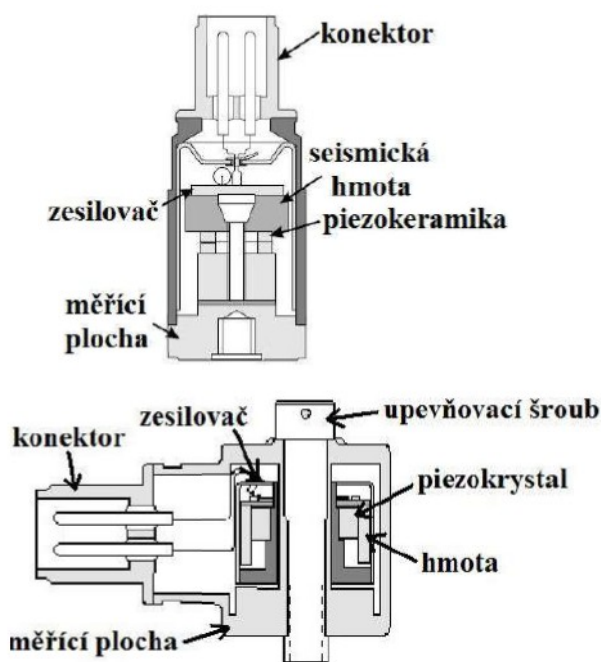
Snímače odchýlky:

Tieto snímače merajú vibračnú odchýlku a strednú polohu medzi rotujúcimi a nerotujúcimi prvkami stroja. Sú určené pre meranie amplitúdy vibrácií, ktorá sa stanoví

zachytením zmeny polohy relatívneho a absolútneho pohybu súčasti. Medzi tieto snímače patria tenzometry a sondy na bázi vírivých prúdov.

Snímače zrýchlenia:

Jedná sa o univerzálne seizmické zariadenie, ktoré vytvára výstupný signál priamo úmerný mechanickému vibračnému zrýchleniu meraného telesa. Tento výstupný signál je možné spracovať tak, aby zobrazoval ľubovoľnú veličinu ako napríklad zrýchlenie, rýchlosť či odchýlku vibrácií. Akcelerometry sa z pravidla montujú na stacionárnu konštrukciu stroja. Najrozšírenejšie sú piezoelektrické akcelerometry, v nich je čidlo, respektíve piezoelektrický člen, spájajúci seizmickú hmotu s rámom snímača. Tento člen vytvára elektrický náboj, ktorý je priamo úmerný pôsobiacej sile. Podľa jeho umiestnenia a hmoty v snímači môžeme rozdeliť akcelerometry na dva typy: Tlakový a šmykový. [11] [12].



Obrázky č. 21,22 – Tlakový a šmykový akcelerometer [10]

Snímače rychlosti:

Sú to absolútne elektrodynamické senzory, ktoré môžu byť v prevedení s pohyblivou cievkou alebo s pohyblivým magnetom. Tuhosť u snímačov s pohyblivou cievkou je daná pružinou a ich seizmická hmota je tvorená cievkou. U snímačov s pohyblivým magnetom je tuhosť daná membránou a seizmickú hmotu tvorí permanentný magnet. U týchto snímačov nie je potrebné používať napájací zdroj ani drahé číslicové multimetre so špeciálnymi zosilňovačmi. Aj tak dosiahneme vysokej úrovne výstupného signálu

a malého vinutia odporu. Medzi nevýhody sa radia ich väčšie rozmery a obmedzený horný kmitočet (2000 Hz – 3500 Hz). [12].

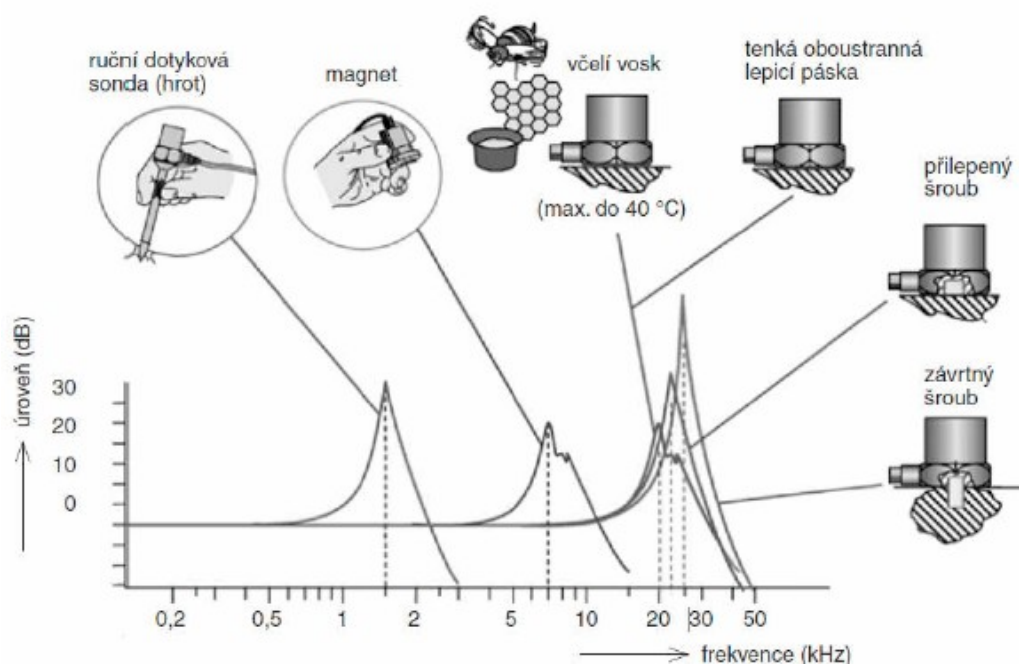
Pre naše meranie sme využívali snímače zrýchlenia, pretože odchýlku a rýchlosť určíme jednoducho pomocou integrujúcich členov.

Uchytenie snímačov:

Vysoký vplyv na presnosť merania má spôsob uchytenia snímača k meranému miestu. Voľba správneho upevnenia sa riadi podľa ČSN ISO 5348.

Základné spôsoby uchytenia snímačov a ich vplyv na výkonnosť snímača s rezonanciou 30 kHz:

- Pevný skrutkový spoj – Žiadne zníženie rezonančnej frekvencie akcelerometra v dôsledku pripevnenia.
- Izolovaný skrutkový spoj – Pokiaľ je pre zabránenie vzniku zemných slučiek a iných vplyvov použitý tuhý nevodivý materiál, ako je podložka zo sľudy, montážna rezonančná frekvencia je mierne znížená asi na 28 kHz.
- Prilepený tuhým lepidlom – Rezonancia je znížená asi na 28 kHz.
- Prilepený mäkkým epoxidom – Rezonancia je znížená asi na 8 kHz.
- Pripevnený permanentným magnetom – Rezonancia je znížená asi na 7 kHz.
- Ručná sonda so snímačom – Rezonancia je znížená asi na 2 kHz, ale táto metóda nie je doporučená pre meranie nad 1 kHz. [12]



Obrázok č.23 – Vplyv uchytenia na frekvenčný rozsah snímača [9]

7.6 Meranie celkových vibrácií

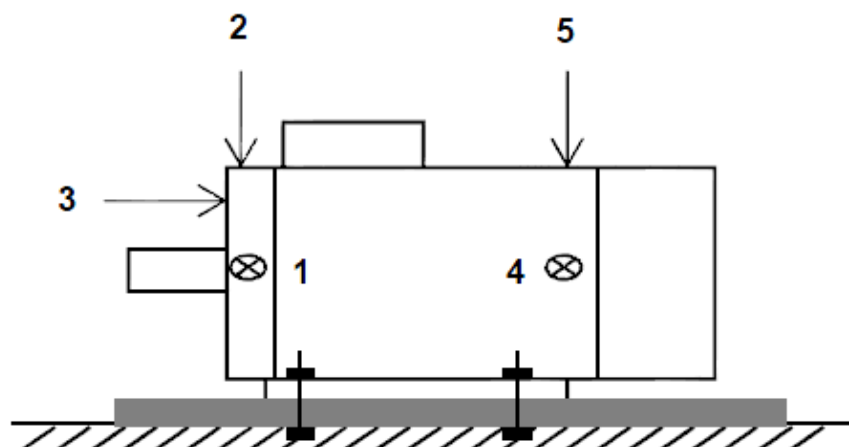
Celkové vibrácie predstavujú celkovú vibračnú energiu v istom frekvenčnom rozsahu. Meraním celkových vibrácií stroja, alebo jeho častí a porovnaním tejto hodnoty s jej normálnou úrovňou (normou) získame informáciu o stave stroja. Ak zistíme vyššiu, než normálnu úroveň celkových vibrácií, potom možno povedať, že existuje niečo, čo spôsobuje tieto vyššie hodnoty. Vibrácie sú považované za najlepší prevádzkový parameter, podľa ktorého možno posudzovať nízkofrekvenčné dynamické stavy, ako je nevyváženosť, nesúosovosť, nedostatočne tuhé základy, ohnutý hriadeľ, nadmerné opotrebenie ložísk, alebo ulomenie lopatiek rotora. [18].

Frekvenčný rozsah, v ktorom je prevádzané meranie celkových vibrácií, závisí na type použitého monitorovacieho zariadenia. Niektoré prístroje majú preddefinovaný frekvenčný rozsah, v ktorom prevádzajú merania celkových vibrácií. Iné umožňujú užívateľovi voľbu frekvenčného rozsahu. Dôležité je aby bolo zaistené meranie oboch hodnôt v rovnakom frekvenčnom spektre. [18].

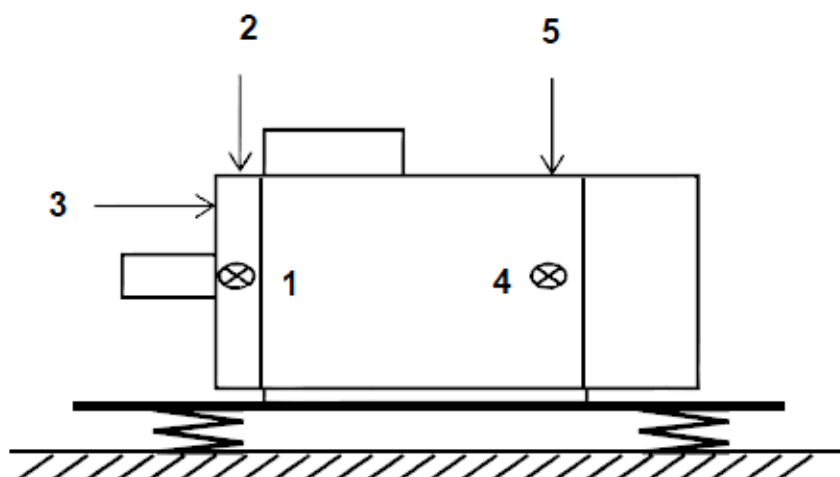
Pri našom meraní sa jedná sa o meranie efektívnej hodnoty vibrácií v pásme 10 až 1000 Hz. Zhodnotenie merania sme vykonali v spolupráci s firmou Siemens elektromotory s.r.o. podľa normy ČSN EN 60034-14 /2007. Táto norma stanoví postupy pre meranie vibrácií pri výrobnej skúške a medzné hodnoty vibrácií pre určité elektrické stroje za stanovených podmienok ak sú tieto stroje odpojené od akejkoľvek záťaže alebo hnacieho stroja. Platí pre jednosmerné a trojfázové striedavé stroje s výškou osy od 56 mm a s menovitým výkonom do 50 MW, s prevádzkovými otáčkami od 120 min^{-1} do $15\,000 \text{ min}^{-1}$.

7.7 Voľba meracích miest

Pri voľbe meracích miest sme postupovali podľa normy ČSN EN 60034-14 /2007 a meracie miesta sme volili tak, aby bolo možné opakované meranie za rovnakých podmienok ako pri predošlom meraní. Meranie sme uskutočnili za prevádzkových podmienok a v dvoch rôznych uloženiach motora. V pevnom a pružnom uložení. Vibrácie sme merali v troch smeroch: Vertikálnom, horizontálnom, axiálnom. Pozície jednotlivých meracích bodov sú označené na obrázku č. 24 a 25.



Obrázok č. 24 – Meracie miesta pri pevnom uložení



Obrázok č. 25 – Meracie miesta pri pružnom uložení

7.8 Meracia technika

V dnešnej dobe nie sme obmedzený na výber jedného prístroja. Môžeme vybrať zo širokého sortimentu prístrojov, ktoré sú určené na monitorovanie vibrácií. Moderné prístroje sú schopné určiť príčiny, respektíve závady spôsobujúce vadný chod stroja. Medzi popredných svetových výrobcov patria firmy: BRÜEL & KJÆR, SKF, PRÜFTECHNIK, SCHENCK a iné. Pre meranie vibrácií bol použitý prístroj SKF Microlog CMXA-48 (10 – 1000Hz). Ako zdroj napájania prístroja bola použitá elektrická sieť. Ako snímač bol volený akcelerometer a počas merania bol pripevnený permanentným magnetom. Bol umiestnený tak aby bol čo najbližšie k ložisku, pretože cesta šírenia signálu musí byť čo najkratšia.



Obrázok č.26 – SKF Microlog CMXA – 48 (10 – 1000Hz) a sonda s akcelerometrom [14], [15]

7.9 Výsledky merania

Z nameraných veličín sme zostavili prehľadné tabuľky č. 4 a 5, v ktorých sú zobrazené hodnoty veličín ako sú: Rýchlosť, zrýchlenie a maximálna výchylka. Jednotlivé veličiny sme zmerali pre štandardné ložiská, ako aj pre energeticky účinné ložiská.

Po vykonaní merania sme z nameraných hodnôt meraných veličín vyhodnotili, že žiadna nepresahuje cez hodnoty povolené normou. Vzhľadom na porovnanie ložísk, vykazujú energeticky účinné ložiská o niečo málo vyššie vibrácie ako štandardné ložiská. Tento jav môže spôsobovať nesúosovosť hriadeľov dynamometra a elektromotora alebo nedostatočne tuhé základy elektromotora, čiže ukotvenie ku pracovnej doske.

Merané miesto	Rýchlosť v_{eff} [mm/s]		Zrýchlenie a_{eff} [m/s ²]		Odchýlka s_{eff} [μm]	
	Ložiská A	Ložiská B	Ložiská A	Ložiská B	Ložiská A	Ložiská B
1	0,40	0,73	0,74	1,36	0,35	0,45
2	0,15	0,19	0,16	0,29	0,45	0,34
3	0,12	0,25	0,40	0,45	0,36	0,54
4	0,17	0,21	0,27	0,30	0,39	0,38
5	0,11	0,11	0,24	0,25	0,26	0,23
NORMA	1,80		2,80		29	

Tabuľka č.4 – Pevné uloženie motora [19]

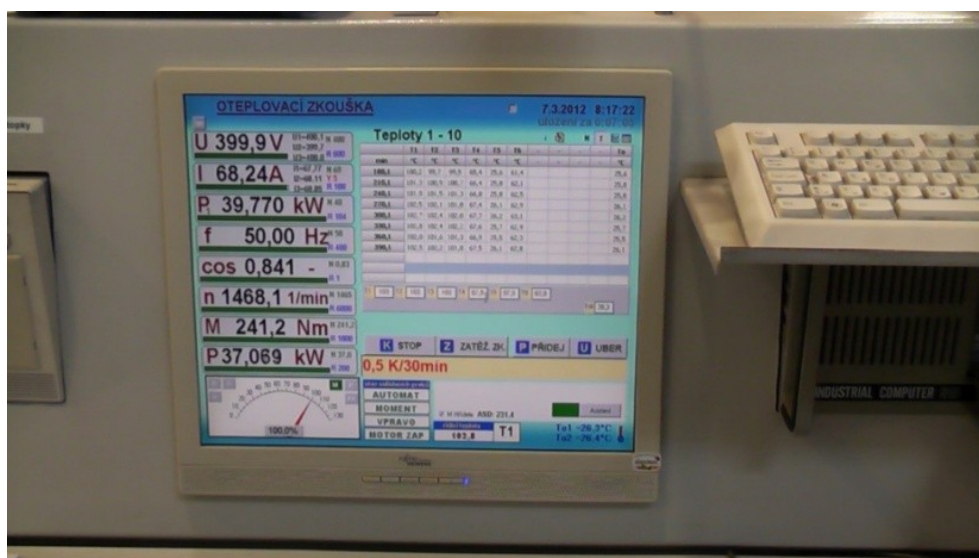
	Rýchlosť v_{eff} [mm/s]		Zrýchlenie a_{eff} [m/s ²]		Odchýlka s_{eff} [μm]	
Merané miesto	Ložiská A	Ložiská B	Ložiská A	Ložiská B	Ložiská A	Ložiská B
1	1,39	1,41	0,24	0,22	10,03	10,21
2	1,41	1,50	0,23	0,32	10,19	10,75
3	0,28	0,65	0,58	0,14	1,77	4,68
4	0,20	0,15	0,33	0,24	1,21	0,60
5	0,14	0,13	0,31	0,25	0,60	0,63
NORMA	2,2		3,5		35	

Tabuľka č.5 – Pružné uloženie motora [19]

8 Otepľovacia skúška motora

Veľmi dôležité pri skúšaní motorov je overenie teplôt jednotlivých častí motora. Hranice teplôt určujú jednak normy, napríklad normy pre nevýbušné a zabezpečené prevedenie motorov, jednak sú limitované dovolenými teplotami pre použité materiály. Teploty vinutia podľa izolačnej triedy alebo teploty ložísk podľa dovolených teplôt mazacieho tuku. [18].

Vzhľadom na výrobcovu garanciu nižších hodnôt hladiny oteplenia ložísk oproti ložiskám štandardným, sme v spolupráci s firmou Siemens elektromotory s.r.o. vykonali otepľovaciu skúšku motora. Ako prvé sme testovali elektromotor so štandardnými ložiskami a neskôr aj energeticky účinné ložiská.

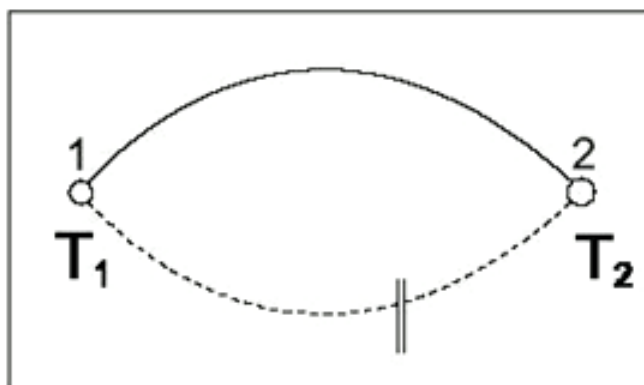


Obrázok č.27 – Priebeh otepľovacej skúšky [autor]

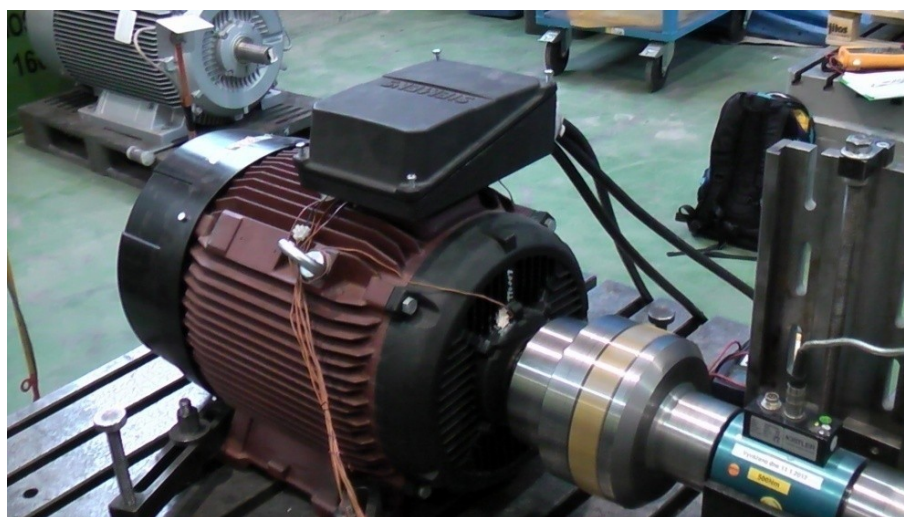
8.1 Termoelektrické snímače teploty

Termoelektrické snímače teploty používame k diaľkovému meraniu teploty a ich čidlo (termoelektrický článok) prevádza teplotnú zmenu prostredia na zmenu elektrického napätia. Využíva sa pritom toho, že ak sú v jednoduchom elektrickom obvode, tvorenom dvoma vodičmi z rôznych kovov, oba ich spoje 1 a 2 umiestnené v prostredí s dvoma rôznymi teplotami T1 a T2, začne obvodom prechádzať elektrický prúd. Pokiaľ obvod v naznačenom mieste prerušíme a zaradíme do nej vhodný merací prístroj, nameráme malý rozdiel elektrických potenciálov, ktorý je funkciou rozdielu teplôt $T_2 - T_1$. Tento rozdiel potenciálov sa nazýva termoelektrické napätie. Takto je zjednodušene popísaný

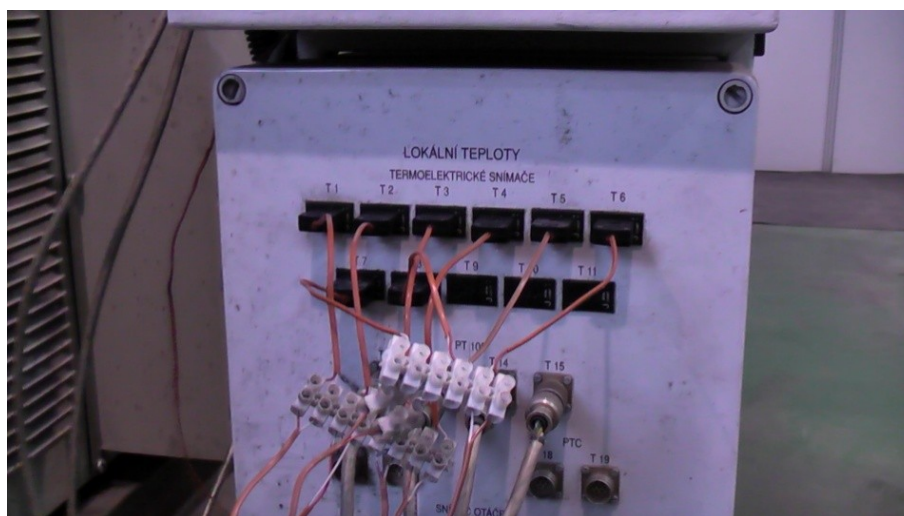
takzvaný Seebeckov jav, na ktorom je založené meranie teploty termoelektrickými článkami (termočlánkami).



Obrázok č. 28 – Seebeckov jav



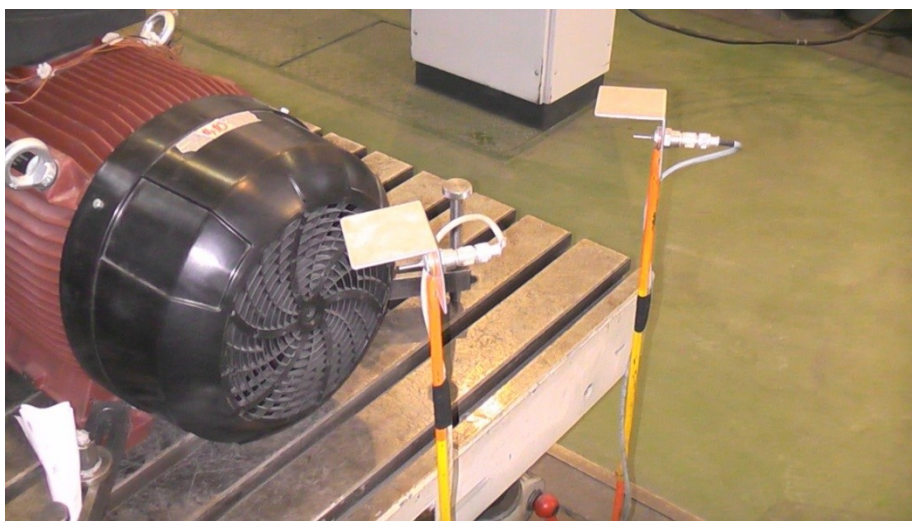
Obrázok č. 29 – Pripojené termoelektrické snímače [autor]



Obrázok č. 30 – Drôty termoelektrických snímačov [autor]

8.2 Popis a vyhodnotenie merania

Meranie teploty bolo vykonané cez termoelektrické články počas vykonávania otepľovacej skúšky motora. Meranie prebiehalo za prevádzkových podmienok, ako sú ustálená prevádzková teplota, prevádzkové otáčky a 100% výkon motora. Teplota okolia pri vypnutí motora sa pri jednotlivých meraniach líšila preto sme vyhodnocovali a porovnávali teplotný prírastok, čiže oteplenie. Teplota okolia pri meraní na štandardných ložiskách bola 26,6 °C a pri nízkoenergetických ložiskách bola 26 °C. Ako doplnkové meranie sme vykonali meranie teploty motora termokamerou Fluke. Na snímkach z kamery je jasne vidieť najkritickejšie miesta oteplenia motora ako aj jeho ložiskových uzlov. Namerané hodnoty teplôt sme vyhodnotili do prehľadnej tabuľky č.6 a vytvorili grafy č.4 a 5 so znázornenými otepľovacími krivkami.

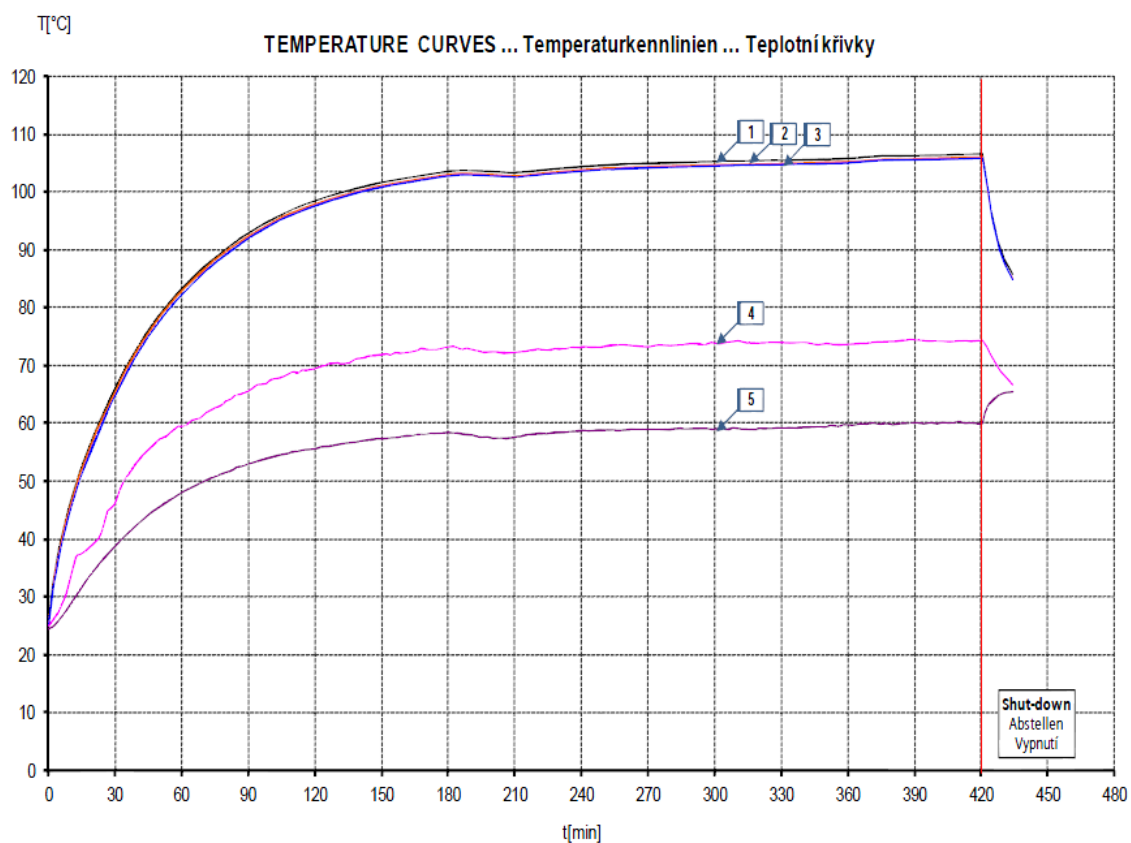


Obrázok č. 31 – Snímače na meranie teploty okolia motora [autor]

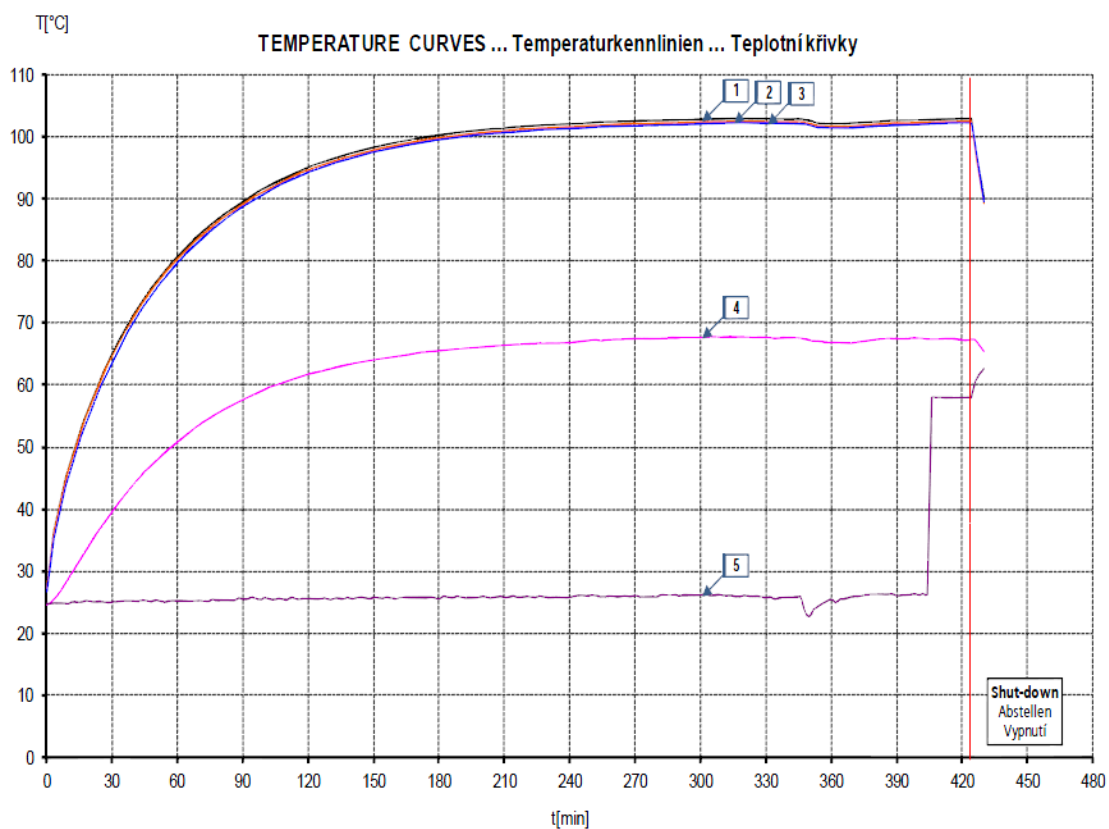
Po vykonaní meranie sme vyhodnotili, že nameraný rozdiel teplôt na ložisku je 6,4 K. V porovnaní s hodnotami udaným výrobcom (5 až 15 °C) sú tieto hodnoty v tolerancii. V prepočte na percentá, vychádza rozdiel v oteplení ložísk 5 %.

Číslo miesta	Miesto merania	Teplota [°C]		Oteplenie [K]	
		Ložiská A	Ložiská B	Ložiská A	Ložiská B
1	Čelo vinutia – U	106,5	102,9	79,9	76,9
2	Čelo vinutia – V	106,1	102,5	79,5	76,5
3	Čelo vinutia – W	105,9	102,2	79,3	76,2
4	Ložisko	74,4	67,4	47,8	41,4
5	Kostra motora	59,9	27,9	33,3	31,9

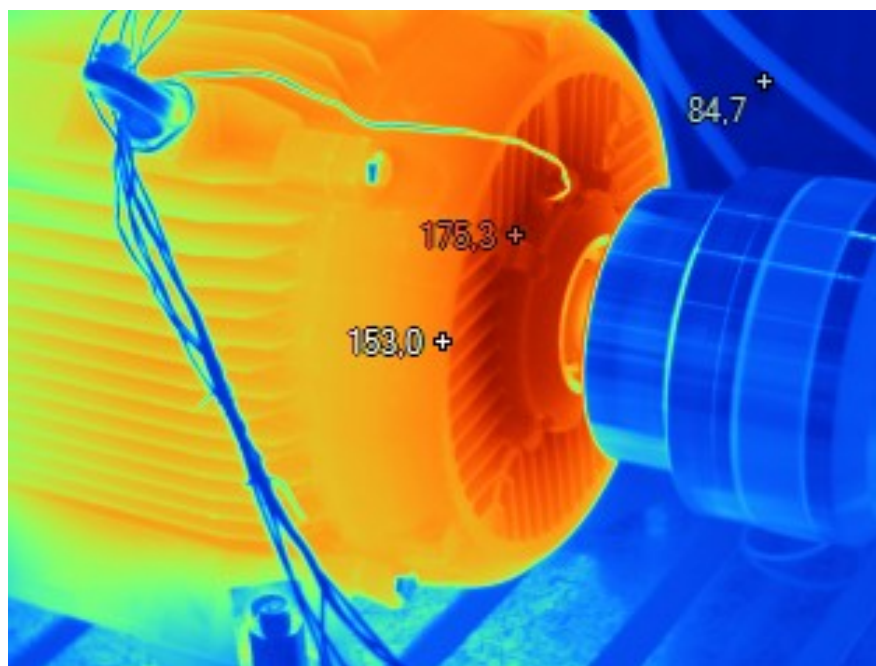
Tabuľka č. 6 – Namerané hodnoty teplôt a prepočet na oteplenie [19]



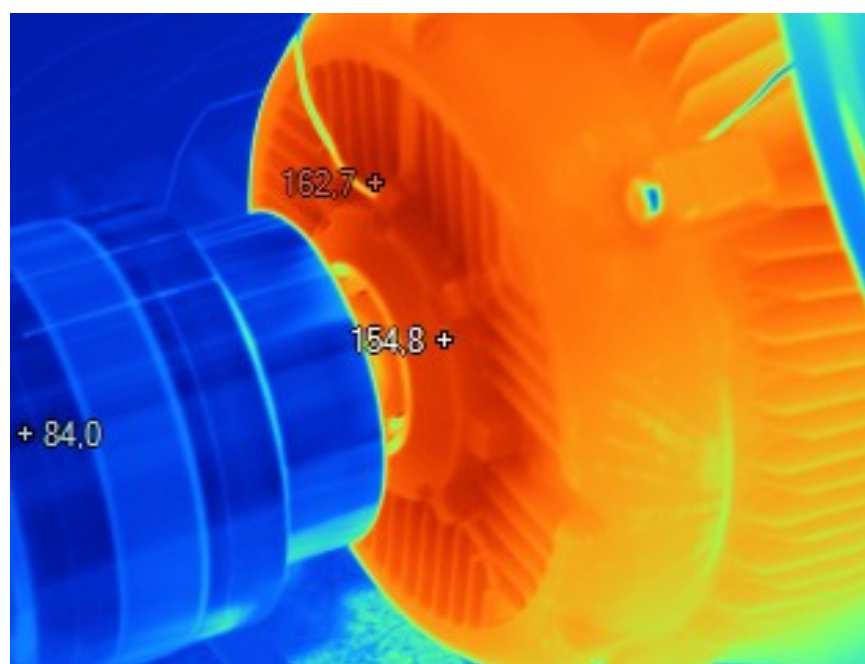
Graf č. 4 – Otepľovacie krivky elektromotora so štandardnými ložiskami [19]



Graf č. 5 – Otepľovacie krivky elektromotora s nízkoenergetickými ložiskami [19]



Obrázok č. 32 – Termosnímok motora so štandardnými ložiskami [autor]



Obrázok č. 33 – Termosnímok motora s energeticky účinnými ložiskami [autor]

9 Meranie hlučnosti motora

Pre porovnanie akustického hluku motora za použitia štandardných a energeticky účinných ložísk sme v spolupráci s firmou Siemens elektromotory s.r.o. vykonali skúšku na určenie akustických hladín výkonu motora.

9.1 Popis merania hlučnosti

Meranie bolo vykonané podľa normy ISO 3743-2. Táto norma stanovuje pomerne jednoduchú technickú metódu pre určenie hladín akustického výkonu malých, premiestniteľných zdrojov zvukov ako je v našom prípade motor Siemens. Pri meraní sa motor inštaloval v špeciálne upravenej miestnosti s predpísanou dobou dozvuku v celom sledovanom frekvenčnom rozsahu. Hladina akustického výkonu skúšaného zdroja, čiže motora je určovaná z jednotlivých hladín akustického tlaku nameraných v každej polohe mikrofónu. Táto priama metóda nevyžaduje referenčný zdroj zvuku, ale je pre ňu potrebná špeciálna dozvuková skúšobná miestnosť. Metóda je založená na predpoklade, že časovo a priestorovo priemerované hladiny akustického tlaku v skúšobnej miestnosti je možno použiť k určeniu hladiny akustického výkonu vyžarovaného motorom. Vlastnosti špeciálnej skúšobnej miestnosti boli volené tak aby bol vplyv miestnosti na vyžarovaný akustický výkon motora malý. Norma stanovuje počet polôh mikrofónu a požadovaný počet umiestnení motora v skúšobnej miestnosti. Meranie prebiehalo za prevádzkových podmienok, ako sú ustálená prevádzková teplota, prevádzkové otáčky a 100% výkon motora. [13]

9.2 Meracia technika

Počas meranie sme využívali tieto prístroje:

- Mikrofón - BRÜEL & KJÆR 4942
- Analyzátor - BRÜEL & KJÆR PULSE 3560-C
- Kalibrátor - BRÜEL & KJÆR 4231

9.3 Vyhodnotenie merania

Namerané hladiny akustického výkonu sme zapísali do prehľadných tabuliek č. 7 a 8. Výsledný akustický výkon motora vyšiel u energeticky účinných ložísk nižší ako u štandardných ložísk. Rozdiel hodnôt, ale nie je príliš vysoký, preto v tomto prípade môžeme povedať, že voľba typu ložísk v motore nemá až taký zásadný vplyv na celkovú hlučnosť motora.

Frekvencia otávového pásma [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{WA} (A)
Hladina akustického výkonu [dB]	65,4	77,3	72,9	73,3	67,2	62,0	49,9	76,7

Tabuľka č.7 - Vyhodnotenie hladín akustického výkonu pre motor so štandardnými ložiskami [19]

Frekvencia otávového pásma [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{WA} (A)
Hladina akustického výkonu [dB]	67,2	73,1	73,8	73,6	66,8	58,2	45,2	76,5

Tabuľka č.8 - Vyhodnotenie hladín akustického výkonu pre motor s energeticky účinnými ložiskami [19]

10 Meranie na prázdno

Pre zhodnotenie mechanických strát motora a s tým spojenou účinnosťou ložísk sme v spolupráci s firmou Siemens elektromotory s.r.o. vykonali meranie na prázdno. Charakteristika naprázdno slúži k vyhodnoteniu strát v železe a mechanických strát motora. Meranie na prázdno sa vykonáva v bežných skúšobniach v rámci kontrolnej typovej skúšky motora a slúži k základnému overeniu každého vyrobeného motora

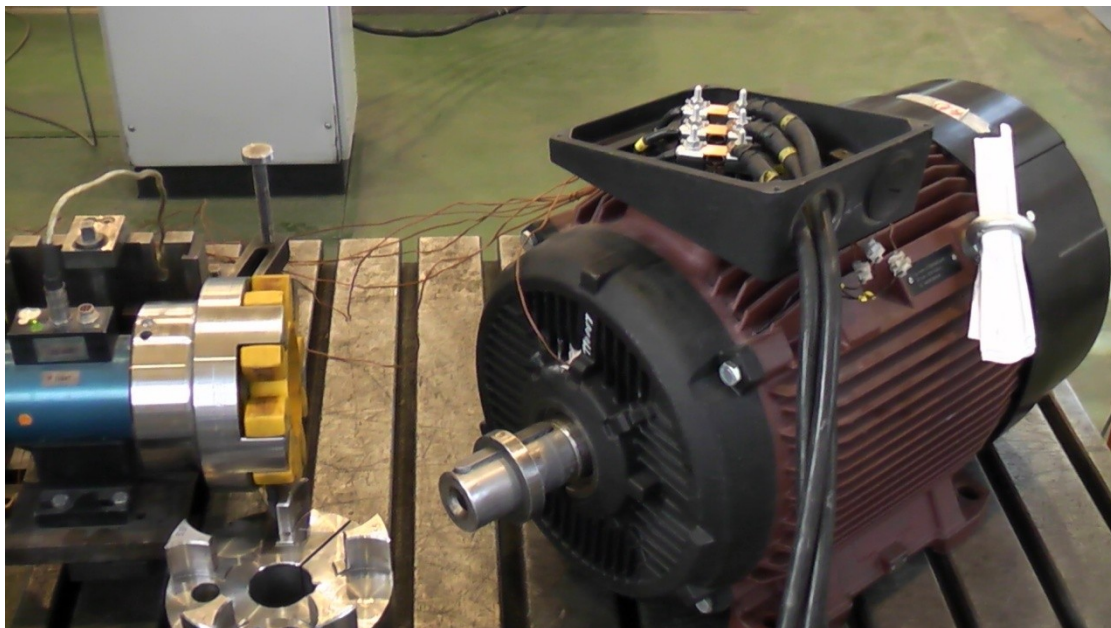
10.1 Charakteristika naprázdno

Je to závislosť strát na prázdno P_0 a prúdu naprázdno I_0 na napájacom napätí U_0 . Motor sa točí bez zaťaženia skoro synchronnou rýchlosťou, odoberá zo siete iba malý príkon (straty na prázdno), ktorý spotrebovávajú na krytie strát na prázdno.

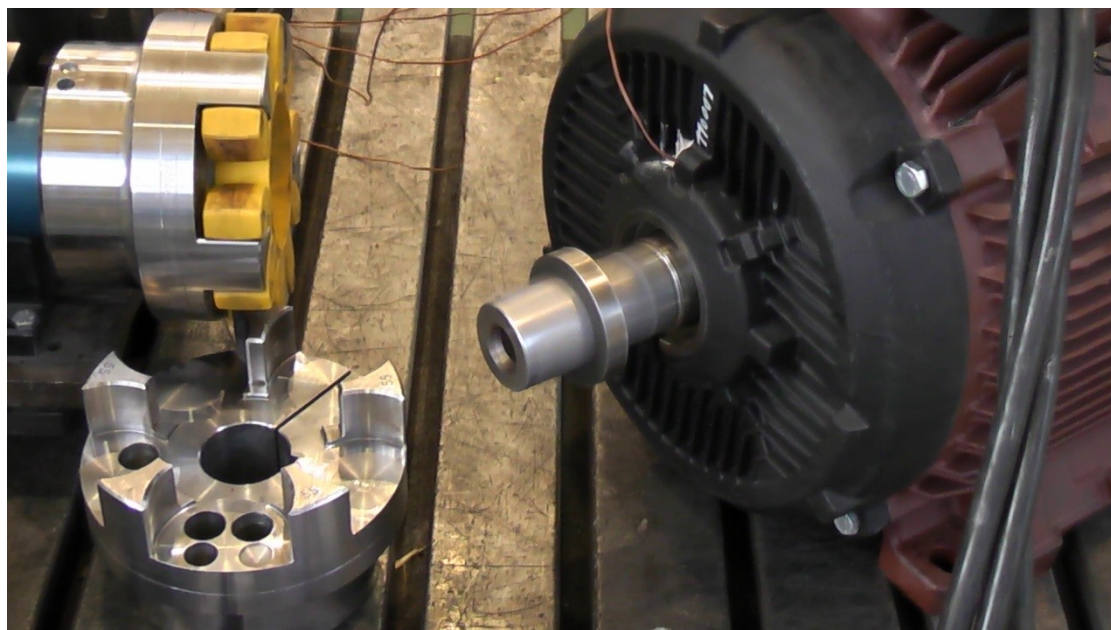
- Straty vo vinutí vplyvom prúdu naprázdno – ΔP_{j10} .
- Straty v železe – ΔP_{fe} , vznikajú zmenou indukcie v aktívnych železných častiach.
- Straty mechanické – ΔP_{mech} , sú tvorené trením v ložiskách a ventilačnými stratami ventilátora, rotora.
- Účinník $\cos\varphi$ je pri chode naprázdno pri U_n veľmi nízky cca. 0,1 , pretože činná zložka prúdu naprázdno je mnohokrát menšia ako je magnetizačná. To znamená, že motor naprázdno sa chová ako indukčnosť.

10.2 Zásady merania

Meranie sa vykonáva v nezaťaženom stave – chod na prázdno. Vykonáva sa na oteplenom motore, kedy sú ložiská zabehnuté a motor má pracovnú teplotu. Je to meranie pri veľmi nízkom účinníku, čo kladie nároky na vhodnosť prístrojov z hľadiska presnosti merania. Pretože straty na prázdno majú u väčšiny motorov kolísavý charakter, je nutné zachytiť strednú hodnotu alebo zmerať maximálnu a minimálnu hodnotu. Chyby vo vyhodnotení mechanických strát z dôvodu kolísania P_0 môžu byť dosť veľké a skresliť tak výsledok vyhodnotenia strát a účinnosti. Behom chodu naprázdno sa súčasne subjektívne posudzuje chod motora či nevydáva neobvyklé zvuky a či sa výrazne nechveje.



Obrázok č. 34 – Motor pripravený pre meranie na prázdno [autor]



Obrázok č. 35 – Motor pri chode na prázdno [autor]

10.3 Postup merania

Charakteristika naprázdno sa meria od najvyššieho napätia cca 125 % U_n zostupne po asi 20 % U_n . Minimálny počet nameraných bodov je daný normami a je stanovený na:

- Medzi 125 a 60 % U_n minimálne 3 body
- Medzi 50 a 20 % U_n minimálne 3 body

V skutočnosti meriame viac bodov pre presnejšie vyhodnotenie strát extrapolácií a interpolácií. Pred meraním charakteristiky a po skončení merania je nutné premerať odpor vinutia. Stačí v jednej vetve (presnejšie – napríklad U1-V1), ktorý je potrebný pre výpočet strát naprázdno ΔP_{j10} vo vinutí. Pri každom nastavenom napätí merať U_0 , P_0 , I_0 (I_0 – prúd v prívodoch). Prúd v jednotlivých fázach vinutia pri menovitom napätí pre zistené prúdové nesúmernosti.

10.4 Vyhodnotenie merania

Kontrola nameraných bodov:

Je potrebné skontrolovať namerané body v oblasti okolo 20 % U_n , pretože sa môže stať, že prúd I_0 neklesá, ale začína stúpať. Tieto body je nutné z charakteristiky vylúčiť. To sa najčastejšie prejavuje pri dvoj pólových motoroch. Je to spôsobené tým, že mechanické straty začnú prevládať nad elektrickými stratami (tvorené prevažne magnetizačnou zložkou prúdu) a tým začne stúpať činná zložka prúdu. Taktiež v tomto prípade začnú klesať aj otáčky motora a už nie je splnená podmienka synchronných otáčok.

Vyhodnotenie:

Rozdelenie strát: $P_0 = \Delta P_{j10} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$

Straty v železe sú závislé na kvadráte napätia: $\Delta P_{fe} = f(U^2)$

Straty naprázdno vo vinutí $\Delta P_{j10} = 1,5 \cdot R_{sv} \cdot I_0^2$, kde za R_{sv} sa berie priemer odporov pred a po meraní alebo sa tieto krajné odpory rozpočítajú lineárne k jednotlivým meraným bodom charakteristiky.

Mechanické straty vyhodnotíme zo sumy $\Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$ z časti medzi 50 % až 20 % U_n . Pretože mechanické straty sú konštantné a straty v železe sú závislé na kvadráte napätia, je možné mechanické straty získať extrapoláciou $\Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$ do nulového napätia, kedy osa x je U^2 . Táto závislosť dáva pri nízkych hodnotách sýtenia (nízke napätie) priamku, ktorá môže byť extrapolovaná do nulového napätia, aby sa získali mechanické straty. Podkapitoly 10.1 až 10.4 som čerpal z literatúry [19].

10.5 Vyhodnotenie merania na prázdno so štandardnými ložiskami

Namerané hodnoty U_0 , P_0 , I_0 a rozpočítané hodnoty odporov na svorkách sme zapísali do prehľadnej tabuľky č.9. Vypočítali sme hodnoty strát vo vinutí ΔP_{j10} a po ich odpočítaní od P_0 sme dostali sumu strát vo vinutí a mechanických strát $\Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$. Z výsledných hodnôt sme zostavili graf č.6, ktorý zobrazuje charakteristiku na prázdno.

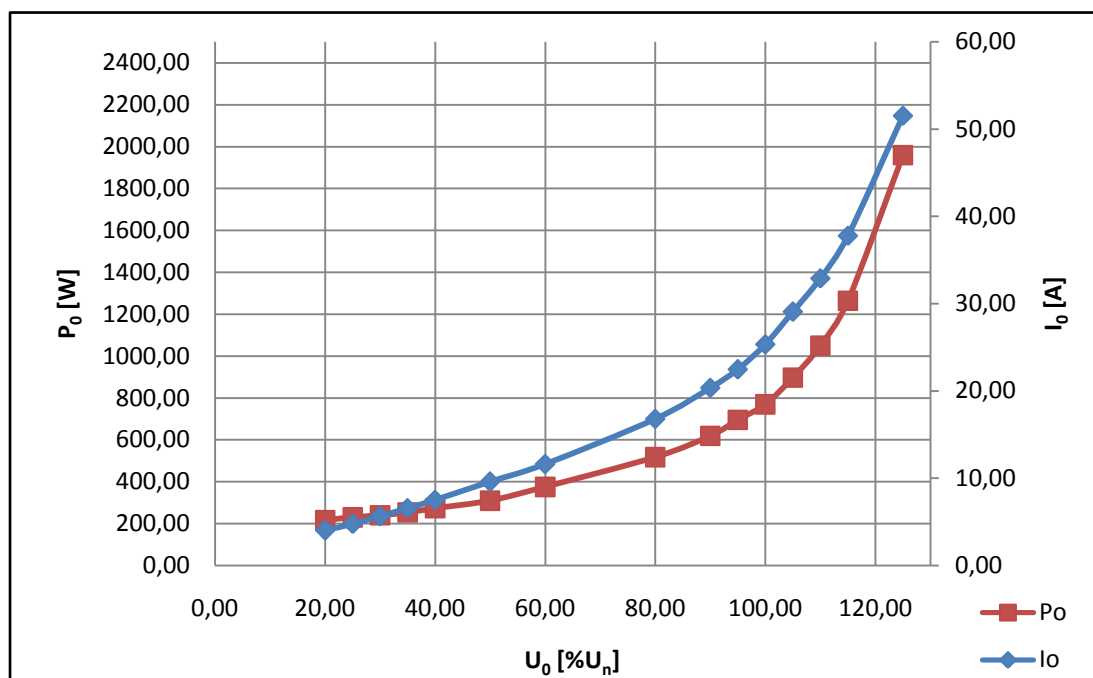
U_0 [V]	U_0 [%]	I_0 [A]	P_0 [W]	R_{sv} [Ω]	ΔP_{j10}	$\Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$	U_0^2
500,01	125,00	51,55	1960,00	0,1369000	545,6411	1414,36	15625,63
459,97	114,99	37,79	1264,00	0,1367071	292,8439	971,16	13223,28
439,97	109,99	32,92	1050,00	0,1365143	221,9342	828,07	12098,35
419,96	104,99	29,08	898,00	0,1363214	172,8879	725,11	11022,90
400,02	100,01	25,36	770,00	0,1361286	131,3225	638,68	10001,00
380,02	95,01	22,47	696,00	0,1359357	102,9755	593,02	9025,95
359,97	89,99	20,36	620,00	0,1357429	84,43732	535,56	8098,65
320	80,00	16,81	518,00	0,1355500	57,45934	460,54	6400,00
240,01	60,00	11,64	376,00	0,1353571	27,52499	348,48	3600,30
199,97	49,99	9,60	310,00	0,1351643	18,68771	291,31	2499,25
160,02	40,01	7,53	274,00	0,1349714	11,46528	262,53	1600,40
140,03	35,01	6,58	254,00	0,1347786	8,742502	245,26	1225,53
119,96	29,99	5,67	240,20	0,1345857	6,490174	233,71	899,40
100,04	25,01	4,78	230,40	0,1343929	4,600855	225,80	625,50
80,03	20,01	4,03	217,40	0,1342000	3,26713	214,13	400,30

Tabuľka č.9 – Namerané a vypočítané hodnoty charakteristiky [19]

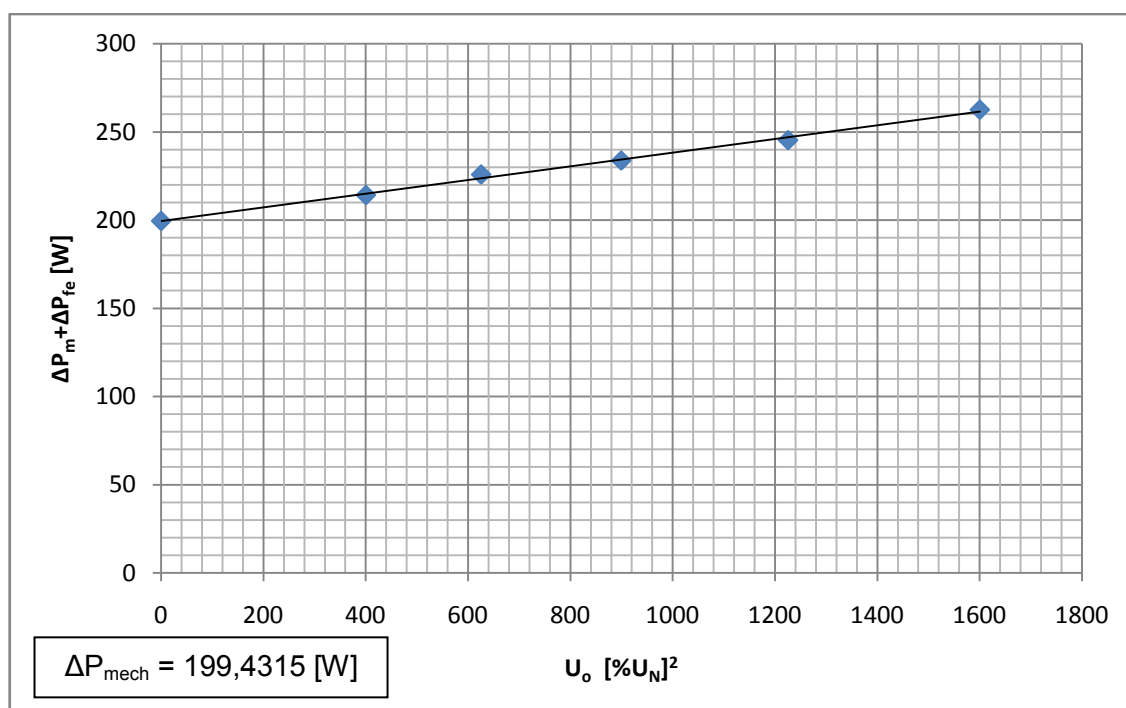
Regresnou analýzou bodov medzi 20 % až 40 % sme zistili výslednú hodnotu mechanických strát, extrapoláciou do nulového napätia. Vypočítané mechanické straty sú teda 199,4315 W.

U_0 [%]	$\Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$	U_0^2
40,01	262,534722	1600,4
35,01	245,257498	1225,525
29,99	233,709826	899,4001
25,01	225,799145	625,5001
20,01	214,13287	400,3001

Tabuľka č.10 – Vypočítané hodnoty mech. strát a strát v železe medzi 20 % až 40 % U_n [19]



Graf č.6 – Charakteristika na prázdno so štandardnými ložiskami



Graf č.7 – Regresná analýza bodov medzi 20 % až 40 % U_n

10.6 Vyhodnotenie merania na prázdno s energeticky účinnými ložiskami

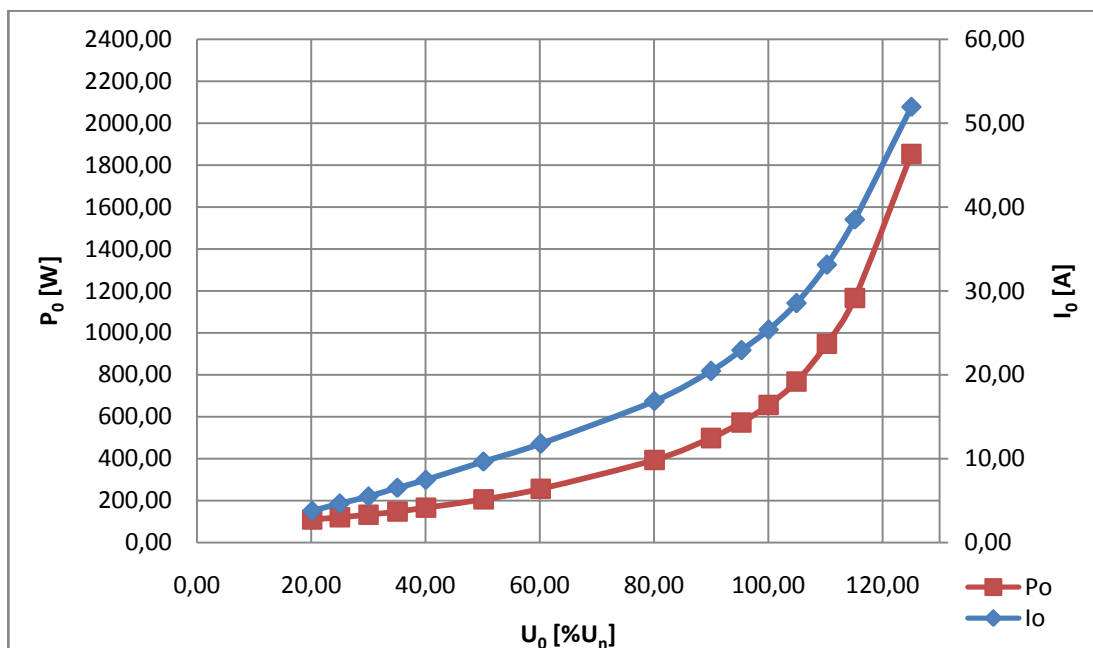
Rovnakým spôsobom ako je popísaný v kapitole 10.5 sme pre motor osadený energeticky účinnými ložiskami zostavili tabuľky s nameranými a vypočítanými hodnotami č.11 a 12. Vytvorili sme graf charakteristiky na prázdno a regresnej analýzy.

U_0 [V]	U_0 [%]	I_0 [A]	P_0 [W]	R_{sv} [Ω]	ΔP_{j10}	$\Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$	U_0^2
500,21	125,05	51,95	1854,00	0,1349000	546,0747	1307,93	15638,13
460,69	115,17	38,52	1166,00	0,1347214	299,9098	866,09	13264,70
441,07	110,27	33,11	948,00	0,1345429	221,3057	726,69	12158,92
419,75	104,94	28,53	768,00	0,1343643	164,0049	604,00	11011,88
400,25	100,06	25,37	656,00	0,1341857	129,5095	526,49	10012,50
381,27	95,32	22,91	572,00	0,1340071	105,5471	466,45	9085,43
359,87	89,97	20,44	498,00	0,1338286	83,8472	414,15	8094,15
320,35	80,09	16,87	394,00	0,1336500	57,07711	336,92	6414,01
240,6	60,15	11,76	256,00	0,1334714	27,69759	228,30	3618,02
200,64	50,16	9,64	206,00	0,1332929	18,59313	187,41	2516,03
160,34	40,09	7,47	166,00	0,1331143	11,14383	154,86	1606,81
140,34	35,09	6,52	148,00	0,1329357	8,488864	139,51	1230,96
120,02	30,01	5,48	132,80	0,1327571	5,987402	126,81	900,30
100,03	25,01	4,64	119,80	0,1325786	4,275396	115,52	625,38
80,63	20,16	3,77	109,20	0,1324000	2,816695	106,38	406,32

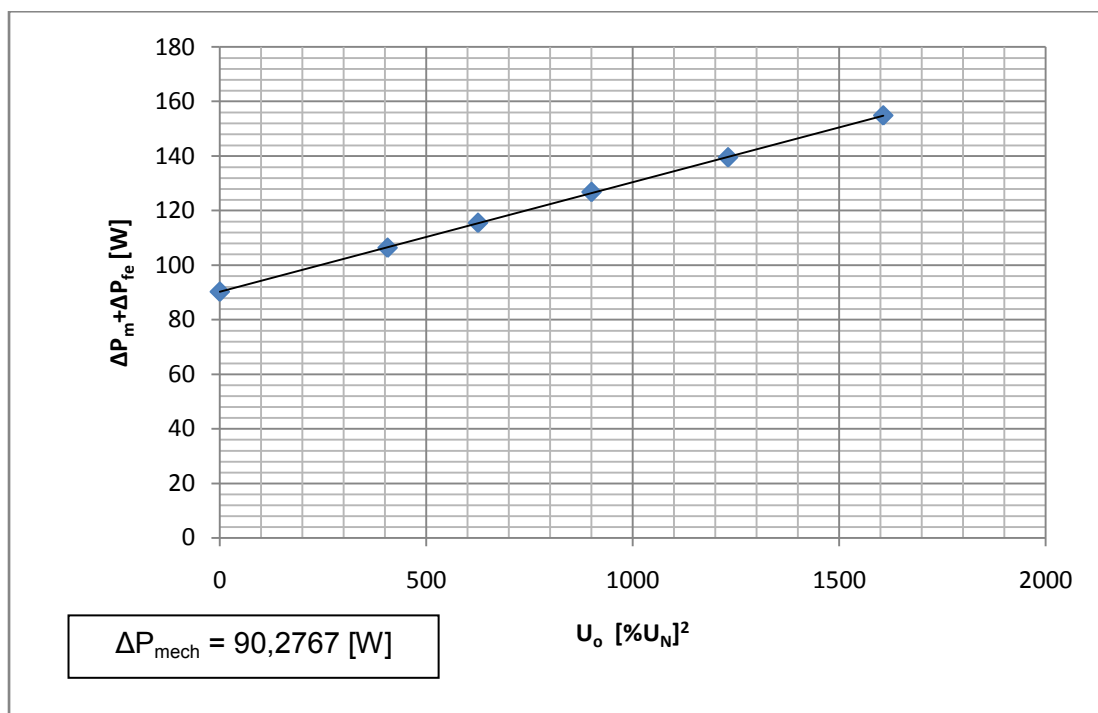
Tabuľka č.11 - Vypočítané hodnoty mech. strát a strát v železe medzi 20 % až 40 % U_n [19]

U_0 [%]	$\Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$	U_0^2
40,09	154,856166	1606,807
35,09	139,511136	1230,957
30,01	126,812598	900,3
25,01	115,524604	625,3751
20,16	106,383305	406,3248

Tabuľka č.12 - Vypočítané hodnoty mech. strát a strát v železe medzi 20 % až 40 % U_n [19]



Graf č.8 - Charakteristika na prázdno s energeticky účinnými ložiskami



Graf č.9 - Regresná analýza bodov medzi 20 % až 40 % U_n

Rovnakým spôsobom ako v kapitole 10.5 sme zistili hodnotu mechanických strát. Vypočítané mechanické straty sú teda 90,2767 [W].

10.7 Vyhodnotenie mechanických strát

Pre porovnanie ložísk z hľadiska mechanických strát sme vykonaným meraním na prázdno zistili mechanické straty motora, ktoré priamo súvisia s ložiskami motora. Motor pri osadení štandardnými ložiskami vykazuje mechanické straty o veľkosti 199,4315 [W]. Pri osadení energeticky účinnými ložiskami dosahujú mechanické straty hodnoty 90,2767 [W]. Rozdiel strát teda činí celkovo 109,1548 [W]. Percentuálne je to 45 %. Na základe tohto merania môžeme povedať, motor so štandardnými ložiskami vykazuje o skoro polovicu vyššie mechanické straty a tým sa zjavne znižuje jeho celková účinnosť.

Záver

Moju tému diplomovej práce som si vybral, pretože problematika ložísk súvisí skoro so všetkými odvetvami strojárstva. Každý vyrobený stroj ktorý obsahuje vo svojej konštrukcii točivé elementy musí obsahovať aj strojné súčiastky pre prenos rotačného pohybu. Týmito súčiastkami sú samozrejme ložiská. Ložiská v značnej miere ovplyvňujú celkovú účinnosť stroja a tým aj jeho energetickú náročnosť. V mojej práci som sa venoval porovnaniu energeticky účinných ložísk s ložiskami štandardnými a zhodnoteniu technických parametrov energeticky účinných ložísk.

V práci som detailne rozpísal a charakterizoval technické parametre oboch typov ložísk. Porovnal tieto parametre z katalógových údajov od výrobcu. Výrobca uvádza, že energeticky účinné ložiská vykazujú o 30 % menšie mechanické straty a o 5 až 15 °C nižšie oteplenie ložísk pri ich prevádzkovom zaťažení. Trieda energeticky účinných ložísk SKF E2 bola vyvinutá za využitia poznatkov v oblasti tribológie, preto boli tieto ložiská navrhnuté aby pracovali s nízkym trením.

Pre overenie týchto technických parametrov sme v spolupráci s firmou Siemens s.r.o. vykonali typovú skúšku elektromotora rady 1LE1 so štandardnými ložiskami a pre porovnanie boli neskôr montované energeticky účinné ložiská. Vykonali sme štyri merania pre porovnanie vlastností motora s rôznymi typmi ložísk.

Meranie vibrácií ukázalo, že energeticky účinné ložiská vykazujú o niečo málo vyššie vibrácie ako štandardné ložiská. Hodnoty všetkých meraných veličín nepresiahli hodnoty dané normou. Hlučnosť motora sme porovnávali pri meraní akustického hluku motora. Motor nevykazoval zmeny v hlučnosti. Otepľovacia skúška motora preukázala nižšie hodnoty oteplenia energeticky účinných ložísk. V porovnaní so štandardnými ložiskami vykazovali energeticky účinné ložiská o 5 % nižšie teploty počas prevádzkového zaťaženia pri otepľovacej skúške motora. Pre porovnanie energetickej účinnosti ložísk sme vykonali meranie na prázdno. Z charakteristiky som vypočítal mechanické straty motora, ktoré dokázali nižšiu energetickú náročnosť. Mechanické straty motora pri použití energeticky účinných ložísk boli až o 45 % nižšie ako pri použití štandardných ložísk.

V dnešnej dobe je nutné aby výrobca stále zdokonaľoval a vyvíjal svoje produkty, či už pre potrebu vyhovieť zákazníkovi alebo je tento proces daný prísnejšími technickými normami. Vykonané merania dokázali nižšiu energetickú náročnosť energeticky účinných ložísk. Elektromotory vybavené týmito ložiskami preto vykazujú menšie mechanické straty a nižšie hodnoty oteplenia. Preto sú tieto ložiská vhodné pre dosiahnutie vyššej účinnosti. Verím, že mojou diplomovou prácou som prispel k pokroku vo vývoji elektromotorov.

Pod'akovanie:

Na tomto mieste by som chcel poďakovať Ing. Janovi Blatovi, Ph.D., za moje vedenie pri spracovaní diplomovej práce a tiež za poskytnuté informácie a čas, ktorý mi venoval. Ďalej ďakujem firme Siemens s.r.o. za poskytnuté podklady a umožnenie vykonať meranie v závode Elektromotory Frenštát. Ďakujem všetkým, ktorí mi pri vypracovaní mojej diplomovej práce boli nápomocný a venovali mi ich čas a poznatky pri konzultáciách.

Použitá literatura:

- [1] ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory.[/i] Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- [2] ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- [3] PETRUŽELKA, J. [i]Ročníkový projekt. Jak psát bakalářskou práci [online]. Ostrava: VŠB-TUO, FS, poslední aktualizace 21. 10. 2006 [cit. 2007-04-10]. Dostupný z WWW: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Jak%20psat.pdf>
- [4] ZELENÝ, Jiří. *Stavba strojů strojní součástí: Učebnice pro střední průmyslové školy*. 2. vyd. Brno: Computer Press, 2003, 157 s. ISBN 80-722-6311-0.
- [5] Hlavní katalog SKF 6000 CS. SKF Group 2007, 1130 s.
- [6] Energeticky účinná kuličková ložiska SKF 6692 CS. SKF Group 2008, 12 s.
- [7] Nízkonapěťové motory 1LE1 SIEMENS D81-0710 CZ. SIEMENS 2007, 99 s.
- [8] KREIDL, Marcel, a kol. Diagnostické systémy. Praha : Vydavatelství ČVUT. 2001. 352 s. ISBN 80-01-02349-4.
- [9] Měření vibrací ve vibrodiagnostice. [online]. Elektronický dokument 2010. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [10] BILOŠ, J. – BILOŠOVÁ, A.: Výběr a montáž akcelerometrů [online]. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2007, elektronické přednášky, 32 s., dostupný z WWW: http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/vibro.htm
- [11] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří.: Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004, 178 s ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.
- [12] KREIDL, M. – ŠMÍD, R.: Technická diagnostika. 1. vydání, BEN – Technická literatura, Praha 2006, 408 s., ISBN 80 – 7300 – 158 – 6.
- [13] ČSN EN ISO 3743-2. Akustika – Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Technické metody pro malé přemístitelné zdroje v dozvukovém poli: Část 2: Metody pro speciální dozvukové zkušební místnosti. 1. vyd. Praha: Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Dostupné z: <http://nahledy.normy.biz/nahled.php?i=85539>

- [14] SKF Microlog CMXA-48 User Manual Part No. 32180600-EN. SKF Reliability Systems 2009, 170 s.
- [15] SKF Microlog Accessories Catalog PUB CM/P1 11643/1 EN. SKF Group 2011, 99 s.
- [16] BELINSKIJ, Vissarion Grigorievič. Vpred. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, 17. február 2010 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://sk.wikiquote.org/wiki/Vpred>
- [17] CAIS, Petr. Mazání ložisek elektromotorů. Ostrava, 2009. Bakalárska práca. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [18] VALENT, Ondrej, Miloš GALÁD a Ľubomír KAČMÁR. Technická diagnostika 1. Praha, 2010. Dostupné z: http://cmms.cz/archiv-clanku/doc_download/3-technicka-diagnostika-i.html. Skriptum. Condition Monitoring and Maintenance Systems.
- [19] Firemné podklady spoločnosti Siemens s.r.o.
- [20] <http://proprumysl.cz> [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Ložisko 6312 SKF. Dostupné z WWW: <http://proprumysl.cz/lozisko-6312-skf/>

Prílohy:

Príloha č.1 – Rozmerový náčrtok meraného elektromotora [20]

Príloha č.2 – Protokol z typovej skúšky elektromotora, štandardné ložiská [20]

Príloha č.3 – Protokol z typovej skúšky elektromotora, energeticky účinné ložiská [20]